UNIVERSIDAD DE COSTA RICA

CIENCIAS APLICADAS

Compiladores:

Cutberto Romero Meléndez.

Francisco Montaño Cuahuilaz.

Universidad Autónoma Metropolitana
AZCAPOTZALCO

UNIVERSIDA

Universidad Nacional Autónoma de México.

D NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

CIENCIAS APLICADAS

2020

RSIDAD NACI
ONAL AUTÓNOMA DE

Cutberto Romero Meléndez. Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco.

Francisco Montaño Cuahuilaz. Universidad Nacional Autónoma de México.

MÉXICO.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO.

Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

Av. San Pablo 180

Col. Reynosa Tamaulipas

Del Azcapotzalco

C.P. 02200

México D.F.

Rector

Dr. Romualdo López Zárate

Secretario

Mtro. Abelardo González Aragón

Director CBI

Dr. Luis Enrique Noreña Franco

Universidad Nacional Autónoma de México

" Por mi raza hablará el espíritu"

C.P. 04510

Ciudad Universitaria.

Rector

Dr. José Narro Robles

Secretario general

Dr. Eduardo Bárzana García

Director General de Asuntos de Personal Académico

Dr. Dante Jaime Morán Zenteno

© Universidad Autónoma Metropolitana

Unidad Azcapotzalco

Universidad Autónoma nacional Autónoma de México

Cutberto Romero Meléndez.

Francisco Montaño Cuahuilaz.

CONTRIBUCIONES A CIENCIAS APLICADAS 2020

México 2020

Comité Organizador

Dr. Cutberto Romero Meléndez. Departamento de Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana, Azcapotzalco México.

Lic. Francisco Montaño Cuahuilaz. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. María de Lourdes Juárez Mosqueda. Facultad De Medicina Veterinaria Y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Martha Beatriz Trejo Salas. Jefa del Departamento de Morfología. Facultad De Medicina Veterinaria Y Zootecnia, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Francisco López-Serrano Ramos. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Olivia Zamora Martínez. Instituto de Geología Universidad Nacional Autónoma de México

M. en I. Rafaela Gutiérrez Lara. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Baltazar Aguirre Hernández. Departamento de Matemáticas. Universidad Autónoma Metropolitana, Iztapalapa México

Dr. David Parra Guevara. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

Comité Científico

Dr. Javier Trejos Zelaya. Facultad de Ciencias, Universidad de Costa Rica.

Dr. Guillermo Salas Banuet. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. José Ramón Bergueiro López. Universidad de las Islas Baleares. Palma de Mallorca, España

Dr. Igor Brilla. Slovak University of Technology, Bratislava, Slovakia

Ing. Hugo Alberto Destéfanis. Universidad Nacional de Salta, Salta, Argentina.

Dra. Ingrid Garcés Millas. Universidad de Antofagasta, Chile

Dr. Edison Gil Pavas. Universidad EAFIT, Medellín, Colombia

Dr. Baltazar Aguirre Hernández. Departamento de Matemáticas. Universidad Autónoma Metropolitana, México

Dr. Héctor Juárez Valencia. Departamento de Matemáticas. Universidad Autónoma Metropolitana, México

Dr. José Hugo Martínez Guerrero. Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia, Universidad Juárez del Estado de Durango, México

Dr. Octavio Reyes Salas. Facultad de Química. Universidad Nacional Autónoma de México.

M. en I. Rafaela Gutiérrez Lara. Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Ing. Alejandro Armando Hossian Corcuera. Universidad Tecnológica Nacional Argentina

Dr. Juan Pablo Aguayo Vallejo. Centro de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico Universidad Nacional Autónoma de México

Quím. María Patricia Girón García. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México

M. en I. Isabel Moromi Nakata. Facultad de Ingeniería Civil Universidad Nacional de Ingeniería, Lima, Perú.

Quím. Blanca Sonia Ángeles García. Instituto de Geología, Universidad Nacional Autónoma de México

Ing. Daniel Martínez Gutiérrez. Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional Autónoma de México

Dr. Jaime Salvador Moysen. Instituto de Investigaciones Científicas, Universidad Juárez del Estado de Durango, México

Dr. René Vargas Aguilar. Instituto Politécnico Nacional, México

M. en A. Alejandro Silva. Instituto de Geología Universidad Nacional Autónoma de México

Dra. Olivia Zamora Martínez. Instituto de Geología Universidad Nacional Autónoma de México

M. en I. Mario Alberto Díaz Cruz. Instituto de Geofísica. Universidad Nacional Autónoma de México.

Dra. Adela Margarita Reyes Salas. Instituto de Geología, UNAM

Dra. Sandra Loera Serna. Departamento de Ciencias Básicas, UAM-A

Dr. Guillermo Montero Martínez. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM

Dr. Ernesto Hernández Mendiola. Instituto de Geología, UNAM

M. en C. Ericka Gabriela García Contreras. Instituto de Geofísica. UNAM

Dr. Juan Adrián Reyes Cervantes. Instituto de Física. UNAM

Prof. Dr. Yuri N. Skiba. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM

Dr. Benjamín Martínez López. Centro de Ciencias de la Atmósfera. UNAM

Dr. Asur Guadarrama Santana. Instituto de Ciencias Aplicadas y Desarrollo Tecnológico. UNAM

Comité Organizador Local

M.Sc. Maribelle Vargas-Montero. Directora del Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas Universidad de Costa Rica.

M.Sc. Paula Calderón Mesén. Centro de Investigación en Estructuras Microscópicas Universidad de Costa Rica

Dr. Carlos M. Valdés González. Director del Centro de Estudios Mexicanos UNAM, Costa Rica

Mtro. Héctor Perdomo Velázquez. Coordinador de Gestión y Relaciones Centro de Estudios Mexicanos UNAM, Costa Rica

Introducción.

El lanzamiento de esta publicación científica y académica permite la concurrencia de expertos que desean promover el intercambio de información en áreas relacionadas con la ciencia y sus aplicaciones. Asimismo, contribuye al reconocimiento en nuestra sociedad, de la importancia y viabilidad de la actividad científica y su amplio espectro de aplicaciones. Son escasas las publicaciones científicas y multidisciplinarias en nuestro país, que reúnen especialistas de diversas ramas del conocimiento, con el propósito de resolver problemas relevantes en nuestra sociedad. Esta empresa contribuirá a establecer redes multidisciplinarias que coadyuven al avance, la aplicación del conocimiento y la difusión de la ciencia y la tecnología.

CONTRIBUCIONES A CIENCIAS APLICADAS 2014 tiene la orientación de estimular la actividad científica y difundir avances recientes en investigación relacionada con la ciencia y su vasto potencial de aplicaciones en áreas tales como: Ingeniería Ambiental, Química Aplicada, Computación , Mecatrónica, Control, Matemáticas, Desarrollo de Software, Ingeniería, Polímeros, Materiales Compuestos, Veterinaria, Electrónica, Eléctrica, Física, Tecnología y Simulación. Asimismo, se incluyen los temas de Educación y Enseñanza.

La presente publicación contiene una colección de 73 artículos, en su versión extendida, que fueron presentados en el Segundo Congreso Multidisciplinario de Ciencias Aplicadas en Latinoamérica, que se llevó a cabo en la ciudad de Guatemala, Guatemala de 7 al 10 de octubre de 2014. Estos artículos fueron seleccionados de un total de 150 trabajos, por el Comité Científico de dicho congreso, el cual estuvo conformado por 17 investigadores de diferentes universidades de Latinoamérica. Algunas de las características comunes de los artículos presentados aquí son su originalidad, relevancia y aplicabilidad a temas afines a nuestra comunidad hispanoparlante, en el dominio de las ingenierías, la física, las matemáticas, la tecnología y la computación, entre otras disciplinas.

Estamos seguros que este trabajo editorial se traducirá en la ampliación del espectro de las aplicaciones de la ciencia e inducirá el establecimiento de redes de colaboración entre investigadores teóricos y experimentales, académicos y profesionistas interesados en campos relacionados con la ciencia y sus aplicaciones.

Indice

Carta Hidrográfica Urbana 1

1. Resumen 1

2. Introducción 1

3. Carta Hidrográfica Urbana (CHU) 2

4. Análisis hidrográfico en una ZoPI 4

5. Clasificación de los Afluentes Urbanos 6

6. Microcuenca Hidrográfica Urbana (MHU) 6

7. Conclusión 7

Identificación y análisis de Microcuencas Hidrográficas en zonas urbanas en riesgo de inundación 8

1. Resumen 8

2. Introducción 9

3. Antecedentes 10

4. Resultados y discusión 10

5. Conclusiones 14

6. Bibliografía 15

Programación cuadrática y cómputo paralelo aplicados al control puntual de emisiones contaminantes 15

1. Resumen 15

2. Introducción 16

3. Descripción del modelo de dispersión 17

4. Formulación y análisis del modelo de programación cuadrática 18

5. Ejemplo numérico de control y discusión 23

6. Conclusiones 27

7. Agradecimientos 27

8. Bibliografía.....28

Estimación de Características de Materiales Utilizando Energía Electromagnética.....29

1. Resumen.....29

2. Introducción.....29

3. Condiciones experimentales.....33

4. Resultados y discusión.....36

5. Conclusiones.....38

6. Bibliografía.....39

Desvulcanización de caucho residual utilizando peróxido de benzoilo como agente desvulcanizante.....39

1. **Resumen**.....39

2. **Introducción**.....39

3. **Metodología**.....40

3.1 Densidad de entrecruzamiento.....41

3.2 Desvulcanización.....42

3.3 Agente desvulcanizante.....42

3.4 Tiempo de reacción.....42

3.5 Temperatura.....42

3.6 Concentración del agente desvulcanizante.....42

3.7 Agitación.....43

4. Resultados y discusión.....43

4.1 Densidad de entrecruzamiento.....43

4.2 Desvulcanización.....44

4.3. Agente desvulcanizante.....44

4.4 Tiempo de reacción.....45

4.5 Temperatura.....46

4.6 Concentración del agente desvulcanizante.....47

4.7 Agitación.....48

5. Conclusiones.....49

6. Referencias.....49

***1. RESUMEN*.....51**

2. INTRODUCCIÓN.....52

3. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN.....53

***4.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM) al sistema poliuretano con arena.*.....59**

***5. CONCLUSIONES*.....62**

***7. BIBLIOGRAFÍA*.....63**

7. Implementación de un método electroquímico para la remoción de sólidos disueltos en agua residual Urbana de la planta de Hidrosistemas de San Román en Córdoba Veracruz.....64

***1. Resumen*.....64**

***2. Introducción*.....65**

***3. Condiciones experimentales*.....66**

***4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN*.....68**

***5. Conclusiones*.....75**

***6. Bibliografía*.....75**

Modelo Electromagnético para LVRPA en el Proceso Fotocatalítico.....75

***1. Resumen*.....76**

***2. Introducción*.....76**

4. Conclusiones.....84

5. Bibliografía.....86

Purificación de ácido benzoico mediante su recristalización.....86

***1. Resumen*.....86**

***2. Introducción*.....87**

3. Condiciones experimentales....91

***4. Resultados y discusión*....96**

***5. Conclusiones*....99**

***6. Bibliografía*....99**

Almost sure exponential robust stability for the Euler-Maruyama scheme in a stochastic controlled Schrödinger equation....99

1. Abstract....100

2. Introduction....100

2.1 Euler-Maruyama method....102

3. Almost sure exponential robust stability and asymptotic stability....103

2. Example....109

5. Conclusion....113

6. References....113

Casos confirmados y mortalidad por COVID-19 en Sudamérica: un análisis comparativo por millón de habitantes....114

1. Resumen....114

2. Introducción....114

3. Condiciones experimentales....115

4. Resultados y discusión....116

5. Conclusiones....123

6. Bibliografía....123

***1. Resumen*....125**

***2. Introducción*....125**

***3. Modelos y regularización del problema inverso*....126**

***4. Ejemplos numéricos y discusión*....130**

***5. Conclusiones*....136**

***6. Agradecimientos*....136**

7. Bibliografía.....136

Metodología Bootstrap en la predicción del Índice de la Bolsa de Valores de Lima, Perú (S&P/BVL) 137

1. Resumen.....137

2. Introducción.....137

2. Condiciones experimentales.....139

3. Resultados y discusión.....141

4. Conclusiones.....145

5. Bibliografía.....146

Determinación del potencial para la producción de microalgas en México, mediante el uso de modelos en un SIG.....146

1. Resumen.....147

2. Introducción.....147

3. Condiciones experimentales.....148

4. Resultados y discusión.....154

5. Conclusiones.....157

6. Bibliografía.....157

Sobre los efectos en la salud humana por el campo electromagnético producido por un teléfono celular.....158

1. Resumen.....158

2. Introducción.....158

3. Condiciones experimentales.....161

4. Resultados y discusión.....163

5. Conclusiones.....166

6. Bibliografía.....166

SiO_2-Based Styrene Emulsion Polymerization: In Search of a Pickering Emulsion.....167

1. Abstract.....167

2. Introduction **167**

3. Experimental **169**

3.2.1 Buffer Solution Preparation 169

4. Results and Discussion **171**

5. Conclusions **175**

6. References **176**

Detección del ángulo de arribo de señales de voz en movimiento 178

1. Resumen 179

2. Introducción 179

3. Condiciones experimentales 180

4. Resultados 184

5. Conclusiones 186

6. Bibliografía 187

Numerical determination of voltage potential inside 2D nonhomogeneous media of circular shape using variational method 187

1. Abstract **188**

2. Introduction **188**

3. Formulation of the problem **188**

4. Results and discussion 191

5. Conclusion 200

6. Acknowledgements 201

7. References 201

1. Resumen 202

2. Introducción 203

2.1 Planta piloto y generación de agua renovada 203

2.2 El pez cebra (Danio rerio) en bioensayos ecotoxicológicos como herramienta de monitoreo en la gestión del agua renovada 204

3. Condiciones experimentales.....205

3.1 Caracterización y cuantificación de la carga de MCO por unidad de proceso de la PTP 205

3.2 Bioensayos con D. rerio.....205

3.3 Determinación de la dosis letal 50 (DL50).....206

3.4 Ensayo de comportamiento.....206

3.5 Balance económico.....207

4. Resultados y discusión.....207

4.1 Caracterización y cuantificación de la carga de MCO por unidad de proceso.....207

4.2 Ensayos de mortalidad y determinación de DL50.....208

4.3 Ensayo de Comportamiento Motil.....211

5. Balance económico: Costos y ventajas obtenidas.....213

6. Conclusiones.....215

***7. Agradecimientos*.....216**

***8. Bibliografía*.....216**

Digestión anaeróbica para la producción de fitorreguladores: efecto del pH inicial y caracterización microbiana del proceso.....217

***1. Resumen*.....217**

***2. Introducción*.....218**

***3. Condiciones experimentales*.....218**

***4. Resultados y discusión*.....221**

***5. Conclusiones*.....225**

***6. Bibliografía*.....225**

Efecto fertilizante de digestatos en cultivo de pasto Ballico perenne.....227

***1. Resumen*.....227**

***2. Introducción*.....227**

***3. Condiciones experimentales*.....229**

4. Resultados y discusión **230**

5. Conclusiones **233**

6. Bibliografía **233**

Obtención de glucosa proveniente de la Papa *Oxalis Tuberosa* empleando dos enzimas comerciales y tres sustratos enzimáticos **234**

1. Resumen **235**

2. Introducción **235**

3. Condiciones experimentales **236**

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN **238**

5. Conclusiones **244**

6. Bibliografía **245**

Producción de ácido cítrico con Aspergillus niger a partir de mieles finales de la caña de azúcar **245**

1.- Resumen **246**

2.- Introducción **246**

3. Condiciones experimentales **246**

5.- Resultados y discusión **249**

5.- Conclusiones **250**

6.- Bibliografía **251**

Sistema de control basado en la reconfiguración de una red neuronal artificial para estimar conjuntos de movimientos en robots modulares tipo cadena **251**

1. Resumen **252**

2. Introducción **252**

3. Desarrollo del sistema **253**

4. Resultados y discusión **259**

5. Conclusiones **260**

6. Bibliografía **261**

Desarrollo de un módulo de construcción del modelo dinámico inverso para un manipulador robótico industrial....262

***1. Resumen*....262**

***2. Introducción*....263**

3. Condiciones experimentales....268

4. Resultados y discusión....273

5. Conclusiones y futuras líneas de investigación....274

6. Bibliografía....275

Sistema de comunicación basado en radio definido por software para un robot modular....276

1. Resumen....276

2. Introducción....276

3. Esquema del sistema de comunicación....277

4. Resultados....282

5. Conclusiones....286

6. Bibliografía....287

Cálculo del rendimiento de combustible y las emisiones de bióxido de carbono de tractocamiones 288

***1. Resumen*....288**

***2. Introducción*....289**

3. Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO2....290

4. Resultados y discusión....291

***5. Conclusiones*....299**

***6. Bibliografía*....299**

Cinemática del flujo en contenedores cilíndricos con impulsores de flujo axial descendente y ascendente....300

1. Resumen....300

2. Introducción....301

3 Planteamiento y solución del problema....302

4 Resultados y discusión....305

5 Conclusiones....310

6 Bibliografía....310

Comparación del desempeño termohidráulico de intercambiadores de calor de tubo doble con aletas longitudinales y helicoidales....311

1. Resumen....311

2. Introducción....311

3. Planteamiento y solución del problema....314

4. Resultados y discusión....318

5. Conclusiones....320

6. Bibliografía....321

Modelo para el cálculo del costo beneficio de una regulación del consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de tractocamiones....322

1. Resumen....322

2. Introducción....322

3. Valor presente neto y tasa de descuento....323

4. Modelo del costo beneficio de un aumento en la eficiencia energética de un tractocamión....326

5. Resultados del VPN para un tractocamión en varios años....328

6. Conclusiones....333

7. Bibliografía....334

Software educativo para la construcción de un sistema hidráulico en un entorno virtual....334

***1. Resumen*....335**

***2. Introducción*....335**

***3. Condiciones experimentales*....336**

***4. Resultados y discusión*....343**

***5. Conclusiones*....343**

6. Bibliografía.....344

Sustracción de gasolinas en México, El uso de tecnologías y resultado de las acciones gubernamentales.....344

1. Resumen.....345

2. Introducción e importancia.....345

3. Metodología.....347

4. Resultados y discusión.....348

5. Conclusiones.....354

6. Bibliografía.....354

Detección de movimiento usando una tarjeta Arty Z7-10 y OpenCV.....355

1. Resumen.....355

2. Introducción.....356

3. Condiciones experimentales.....358

4. Resultados y discusión.....363

5. Conclusiones.....365

6. Bibliografía.....365

Red de sensores láser para protección de equipo de cómputo en un centro de datos.....367

1. Resumen.....367

2. Introducción.....367

3. Condiciones experimentales.....369

4. Resultados y discusión.....375

5. Conclusiones.....377

6. Bibliografía.....377

Solucion Beltsville Thawing (Bts) Permite Mantener La Viabilidad En Los Espermatozoides De Cerdo Incubados Con Nanopartículas Poliméricas De Quitosan. (Resultados Preliminares).....378

1.- Resumen.....379

2.- Introducción.....379

3.- Condiciones experimentales.....380

4.- Resultados y discusión.....382

5.- Conclusiones.....388

6.-Bibliografía.....389

Anticuerpos contra leptospirosis en vacas lecheras y parámetros reproductivos.....391

1. Resumen.....391

2. Introducción.....392

3. Condiciones experimentales.....392

4. Resultados y discusión.....393

5. Conclusiones.....395

6. Bibliografía.....395

Combinación de α-tocoferol y quercetina como antioxidantes para la congelación de semen de verraco y calidad espermática.....396

1.Resumen.....397

2.Introducción.....397

3.Condiciones experimentales.....398

4.Resultados y discusión.....399

5.Bibliografía.....401

Diseño de un material lúdico pedagógico como estrategia metodológica para facilitar el aprendizaje de la tabla periódica (T. P) memorama en la UAM-A.....402

1. Resumen.....402

2. Introducción.....403

3. Condiciones experimentales.....404

4. Resultados y discusión.....406

5. Conclusiones.....407

6. Bibliografía.....408

Trabajo metodológico en el Año académico, forma básica de gestión de la educación en valores 408

1. Resumen.....408

2. Introducción.....408

3. Condiciones experimentales.....409

4. Resultados y discusión.....414

5. Conclusiones.....416

6. Bibliografía.....416

El intercambio educativo como vía para incrementar el poder blando de México.....418

1.Resumen.....418

2.Introducción.....419

3.Condiciones experimentales.....420

4.Resultados y discusión.....420

5.Conclusiones.....426

6.Bibliografía.....426

Movilidad educativa de estudiantes de ingeniería en la Universidad Autónoma Metropolitana……427

1. Resumen.....428

1. Introducción.....428

2. Condiciones experimentales.....429

3. Resultados y Discusión.....430

4. Conclusiones.....439

5. Referencias Bibliográficas.....440

Preconceptos y pensamiento abstracto en alumnos de primer ingreso a la Universidad.....441

1. Resumen.....441

2. Introducción.....442

3. Metodología.....442

4. Resultados y discusión.....443

5. Conclusiones.....447

6. Bibliografía.....447

7. Cuestionario.....448

Simulación de un sistema de medición electrónico didáctico basado en demodulación síncrona para determinar la impedancia eléctrica de un circuito reactivo pasivo.....450

***1. Resumen*.....451**

***2. Introducción*.....451**

***3. Condiciones experimentales*.....452**

***3.1 Amplificación*.....453**

4.Resultados.....466

5.Conclusiones.....468

6. Referencias.....469

Student-led scientific research experiences as a tool for early training of young scientists in a computational medical physics research laboratory.....469

1. Abstract.....469

2. Introduction.....470

3. Experimental conditions.....471

4. Results and discussion.....474

5. Conclusions.....476

6. Bibliography.....477

Estudio comparativo de la adsorción de aluminio de soluciones acuosas usando quitosano y cascarilla de arroz.....477

***1. Resumen*.....478**

***2. Introducción*.....478**

3. Condiciones experimentales.....479

***3.2 Efecto del pH inicial en el porcentaje de remoción de aluminio*.....479**

***3.3 Determinación de las isotermas de adsorción de Aluminio*.....480**

***3.4 Cinética de adsorción de Aluminio*.....480**

3.5 Aplicación de los bioadsorbentes en agua potable.....481

4. Resultados y discusión.....481

4.1 Caracterización de los bioadsorbente por Espectroscopia IR.....481

4.2 Efecto del pH inicial en el porcentaje de remoción de aluminio.....483

4.3 Determinación de las isotermas de adsorción de Aluminio.....484

4.4 Cinética de adsorción de Aluminio.....486

4.5 Aplicación de los bioadsorbentes en agua de consumo.....487

5. Conclusiones.....488

6. Bibliografía.....488

Diseño de una planta recicladora de plásticos de uso agrícola como alternativa para la contaminación en México por estos residuos.....489

1. Resumen.....489

1. Introducción.....490

2. Metodología.....492

3. Resultados y discusión.....494

4. Conclusiones.....499

6. Perspectivas a futuro.....499

7. Referencias.....499

Plan integral para la gestión de residuos peligrosos en la Facultad de Medicina de la UNAM.....500

1. Resumen.....501

2. Introducción.....501

3. Condiciones experimentales.....503

4. Resultados y discusión.....513

5. Conclusiones.....515

6. Bibliografía.....515

Exploración en el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS usando redes neuronales artificiales.....516

1. Resumen.....516

2. Introducción.....516

3. Condiciones experimentales.....519

4. Resultados y discusión.....522

5. Conclusiones.....524

6. Bibliografía.....525

Carta Hidrográfica Urbana

Juan Carlos Mora Chaparro

Universidad Nacional Autónoma de México

Unidad Morelia, Instituto de Geofísica UNAM

1. Resumen

Elaborar una Carta Hidrográfica Urbana (CHU) es indispensable en la actualidad para fomentar un mejor desarrollo urbano y la no construcción social de nuevas zonas de inundación, además de que va a servir como una herramienta para controlar el flujo de agua por las calles y con ello proponer obras y programas preventivos para disminuir las inundaciones y los daños que causan. Una Carta Hidrográfica Urbana se debe elaborar sobre la carta urbana y está compuesta de Afluentes Urbanos (AU), Microcuencas Hidrográficas Urbanas (MHU) y las Zonas en Peligro de Inundación (ZOPI), la Vulnerabilidad Social Expuesta y la Vulnerabilidad Física expuesta.

Una CHU es la representación a detalle de la dirección del flujo de agua pluvial en toda una zona urbana desde su origen, siguiendo la trayectoria que sigue por cada una de sus calles, hasta su desfogue en un cauce, canal, otra calle o una zona de inundación. Una CHU sirve para identificar de donde viene el agua que convierte las calles en ríos urbanos y las zonas donde el agua se acumula, en zonas de peligro de inundación. Una CHU deben ser realizadas en todas las zonas urbanas, ya que son una herramienta para identificar el origen y la dirección que sigue el agua que provoca inundaciones, y para hacer mejores programas de desarrollo urbano.

2. Introducción

La Organización de las Naciones Unidas menciona que América Latina y el Caribe es la segunda región más propensa a desastres naturales, del año 2000 hasta enero del 2020 la región ha enfrentado un promedio de 17 huracanes anuales y 23 de ellos han sido de categoría 5 [1]. La Tormentas más frecuentes e intensas en la región significa que hay menos tiempo para la recuperación entre eventos, en los últimos 20 años, los países más afectados por las tormentas en la región han sido Cuba, México y Haití con 110 tormentas, 5000 muertes, 29 millones de personas siniestradas y 39.000 millones de dólares en daños totales [1]. Las inundaciones son el desastre más común en la mayoría de las ciudades en América y El Caribe. Las inundaciones se consideran una de las catástrofes naturales más costosas debido a la gran variedad y al alcance de los daños. Unos 34 millones de personas han sido afectadas en América y El Caribe, especialmente en México y las islas del Caribe, se encuentran afectados por estos fenómenos naturales en los pasados 20 años. Brasil se encuentra entre los principales países del mundo con mayor población expuesta a estas catástrofes, pero Colombia, Panamá, Costa Rica, Venezuela, Perú, Bolivia, Uruguay y Argentina también han sido afectados. Según la ONU las tormentas que afectan a Centroamérica y el Caribe son cada vez más poderosas y producen un aumento de las precipitaciones [1].

Las zonas urbanas, en general, se han establecido en una cuenca o subcuenca hidrológica, las cuales reciben el agua de sus diferentes afluentes y cada afluente tiene su propia microcuenca.

Las cuencas, subcuencas y microcuencas naturales han sufrido una drástica y acelerada transformación, y ha traído como consecuencia diferentes afectaciones tanto en la superficie como en el subsuelo. La transformación es causada principalmente por la deforestación y el recubrimiento de los suelos, a los cuales ha convertido en suelos impermeables, lo que ha dado origen a la consecuente disminución de la filtración del agua en el subsuelo y el incremento exponencial del agua de escorrentía. Lo anterior ha provocado el desbordamiento de los ríos y afluentes, además del incremento del agua que corre en las calles, las cuales se convierten en ríos que llegan hasta las zonas más bajas y provocan severas inundaciones con numerosos e incuantificables daños a la actividad económica y social donde se presentan.

Antes de iniciar el desarrollo urbano en cada cuenca, subcuenca o microcuenca existía un flujo de agua natural, en el que se concentraban sus afluentes a un río principal. Con el desarrollo urbano los usos del suelo en las cuencas cambiaron drásticamente de suelos de bosques a suelos agrícolas y posteriormente a suelos urbanos.

Durante este crecimiento urbano los cauces tanto de los afluentes como del río principal de las cuencas, subcuencas o microcuencas hidrográficas naturales, han sufrido numerosas modificaciones: han sido entubados, embovedados o convertidos en canales a cielo abierto; en general, se ha reducido su área hidráulica original y otros han pasado a ser calles asfaltadas o pavimentadas. Esto ha generado la transformación de la Red Hidrográfica Natural en una nueva Red Hidrográfica Urbana y, por consiguiente, en la conformación de la red hidrográfica urbana.

Diversos investigadores evidenciaron que los actuales procesos de urbanización e industrialización generan mayores riesgos en las ciudades [2][3]. El incremento del riesgo en el ámbito urbano, se atribuye a los elevados índices de vulnerabilidad y las condiciones de marginalidad que son un factor determinante [4]. Los usos urbanos (edificaciones, viviendas e infraestructura urbana) y la red de transporte intervienen o, en ocasiones, reemplazan los cursos naturales de agua, afectando la geometría de la red de drenaje y reduciendo sistemáticamente la densidad de la misma [5].

La urbanización ha modificado considerablemente los ciclos naturales en las cuencas hidrológicas con el constante cambio de uso del suelo, en el que existe un aumento del área impermeabilizada y una disminución o eliminación de la cobertura vegetal [6].

Una Carta Hidrográfica Urbana (CHU) es la representación a detalle de la dirección del flujo de agua pluvial que sigue la pendiente de cada una de las calles en una zona urbana. Una CHU sirve para identificar el origen del agua que convierte a las calles en ríos urbanos y que, al acumularse, en ciertos sitios, se convierte en un peligro de inundación, cuando ambos se presentan provocan severos daños a sus habitantes.

En la actualidad el desarrollo urbano no ha tomado en cuenta el flujo de agua por las calles, por lo que durante su crecimiento se incrementa la escorrentía superficial por la impermeabilización del terreno y al conectar las nuevas vialidades con las ya existentes, se direcciona y concentra el flujo de agua que corre por las mismas, hasta convertirlas en ríos o afluentes urbanos y zonas de inundación. Una CHU al tener la dirección que sigue el agua por las calles, las calles que se convierten en ríos y las zonas de inundación, va a servir como una herramienta para la toma de decisiones y evitar inundaciones, así como para promover un crecimiento urbano sin fomentar la construcción del riesgo de inundación.

En este trabajo se presenta qué es una Carta Hidrográfica Urbana (CHU), cual podría ser uso, como se elabora y cuáles son los beneficios asociados.

3. Carta Hidrográfica Urbana (CHU)

Las zonas urbanas inician su desarrollo los valles que se localizan al lado de los ríos, los cuales forman parte de una Cuenca o Subcuenca Hidrográfica Natural, en las que por naturaleza existen una intensa biodiversidad, bosques, suelos fértiles y abundante agua. El agua en una cuenca se infiltra hacia el subsuelo y recarga los acuíferos, y escurre desde sus partes más altas (parteaguas), hacia las zonas más bajas a través de los afluentes hasta descargar las mismas en el río principal. Las comunidades para aprovechar los suelos y el agua en la cuenca, se establecen en las zonas medias y altas, mientras que, en las zonas bajas los valles, se desarrolla un mayor crecimiento urbano, que se convierte en una ciudad (Figura 1). El crecimiento urbano en el valle cubre con carpeta asfáltica los suelos naturales y crea calles, los cauces naturales de los afluentes son entubados, embovedados, se convierten en canales o pasan a ser las calles (Figura 1).

Una Carta Hidrográfica Urbana se elabora siguiendo los siguientes pasos.

- Se elije la zona urbana, la zona de estudio debe contar con la carta urbana donde se tengan identificadas las calles de la misma, si no se tiene, se debe de elaborar, ya que es la base para la CHU.

- Se localiza la zona urbana dentro de la Cuenca o Subcuenca Hidrológica a la que pertenece.

- Se obtiene la carta topográfica de la Cuenca o Subcuenca Hidrológica.

- Se obtiene la Carta Hidrográfica Natural.

- Se obtienen todas las Zonas de Peligro de Inundación.

- Se sobreponen las cartas anteriores y se obtiene el mapa base con la topografía, las calles, avenidas, arroyos, zonas de conducción o acumulación de agua, ríos y cruces entre calles y calles y ríos o arroyos.

- Sobre el mapa base y siguiendo la pendiente, curvas de nivel del mapa topográfico, se registra la dirección que sigue el flujo de agua y se identifica la intersección durante su trayecto con arroyos, cauces de arroyo o canales. En esta etapa se relaciona el flujo de agua por las calles con las zonas de Peligro de Inundación.

- La carta resultante se utiliza como base para el trabajo de campo, en el que se va a verificar la pendiente, obstáculos o barreras, cruce de calles y cauces, además se va a verificar la delimitación de las Zonas de Peligro de Inundación y la altura que alcanza el agua en las mismas, a través de realizar encuestas a la población del lugar.

- Con los resultados obtenidos en campo, se incorporan y se obtiene la Carta Hidrográfica Urbana con las Microcuencas Hidrográficas Urbanas asociadas o no a las Zonas de Peligro de Inundación.

- Una vez identificadas las Microcuencas Hidrográficas Urbanas asociadas a las Zonas de Peligro de Inundación, se realizará un mayor detalle en cada una de estas microcuencas para identificar las calles y las áreas que aportan un mayor volumen de agua, mediante la clasificación de los niveles de cada afluente e identificación de los afluentes principales.

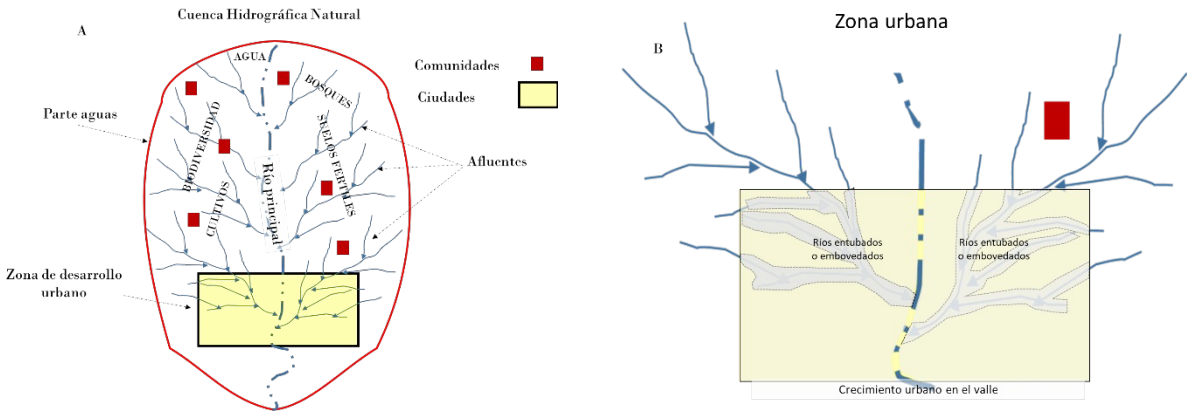


Figura 1.- A) Dibujo representativo de una Cuenca Hidrográfica Natural y la localización de las zonas urbanas comunidades y ciudades. B) Dibujo que muestra una ampliación de la zona urbana, Ciudad, y como los cauces de los afluentes son entubados, embovedados o pasan a ser calles.

Las calles en la mayoría de las zonas urbanas siguen las pendientes naturales y conservan el cauce del río principal y crecen alrededor del mismo. En una zona urbana las calles se conectan unas con otras y en la temporada de lluvias el agua escurre por las mismas, de las partes más altas a las partes más bajas, entre más cruces de calles existen aumenta el volumen y flujo de agua, es por ello que se convierten en ríos y donde se acumula provoca inundaciones (Figura 2).

La Carta Hidrográfica Urbana es la representación de la dirección del flujo de agua de escorrentía por cada una de las calles de la zona urbana, desde su origen hasta su desfogue final, ya sea a otra calle, una avenida, un canal, el cauce de un rio, un lago o una zona de inundación. Sobre la Carta Urbana de la zona de estudio se le sobrepone la pendiente que sigue el terreno natural y si existe la topografía del lugar (Figura 2).

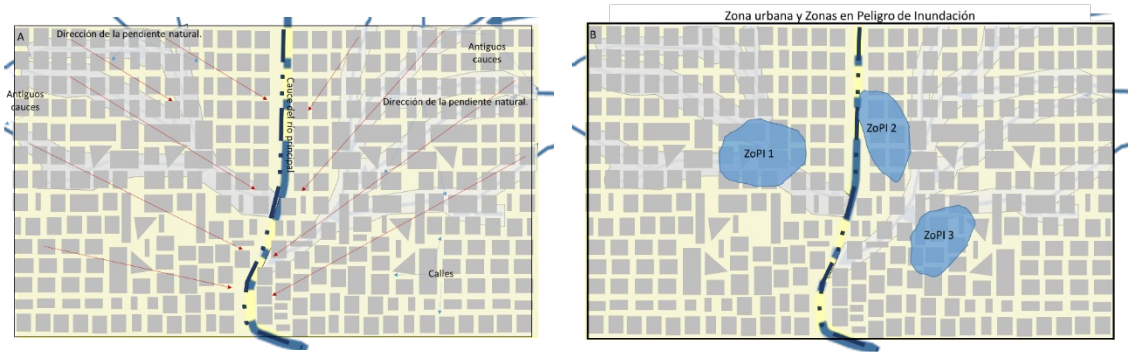


Figura 2.- Dibujos esquemáticos que ayudan a explicar, A) La dirección de la pendiente original prevalece en las calles de la zona urbana, solo que ahora es redireccionada por la misma construcción de las viviendas e infraestructura. B) Dibujo donde se localizan tres zonas de inundación dentro de la zona urbana y que van a servir de ejemplo para su análisis.

4. Análisis hidrográfico en una ZoPI

Una Carta Hidrográfica Urbana (CHU) está compuesta por Afluentes Urbanos (Au), Zonas en Peligro de Inundación (ZoPI) y Microcuencas Hidrográficas Urbanas (MHU). La Carta Hidrográfica Urbana debe de tener la dirección que sigue el agua en cada uno de los Afluentes Urbanos, hasta su zona de descarga. En general el agua escurre por las calles, ahora denominadas afluentes urbanos, sigue la pendiente natural del terreno, solo que ahora la dirección se va modificando conforme encuentra obstáculos por las mismas construcciones y cambia su dirección. En la CHU es necesario seguir todas las direcciones que sigue el agua por las calles hasta su descarga final (Figura 3).

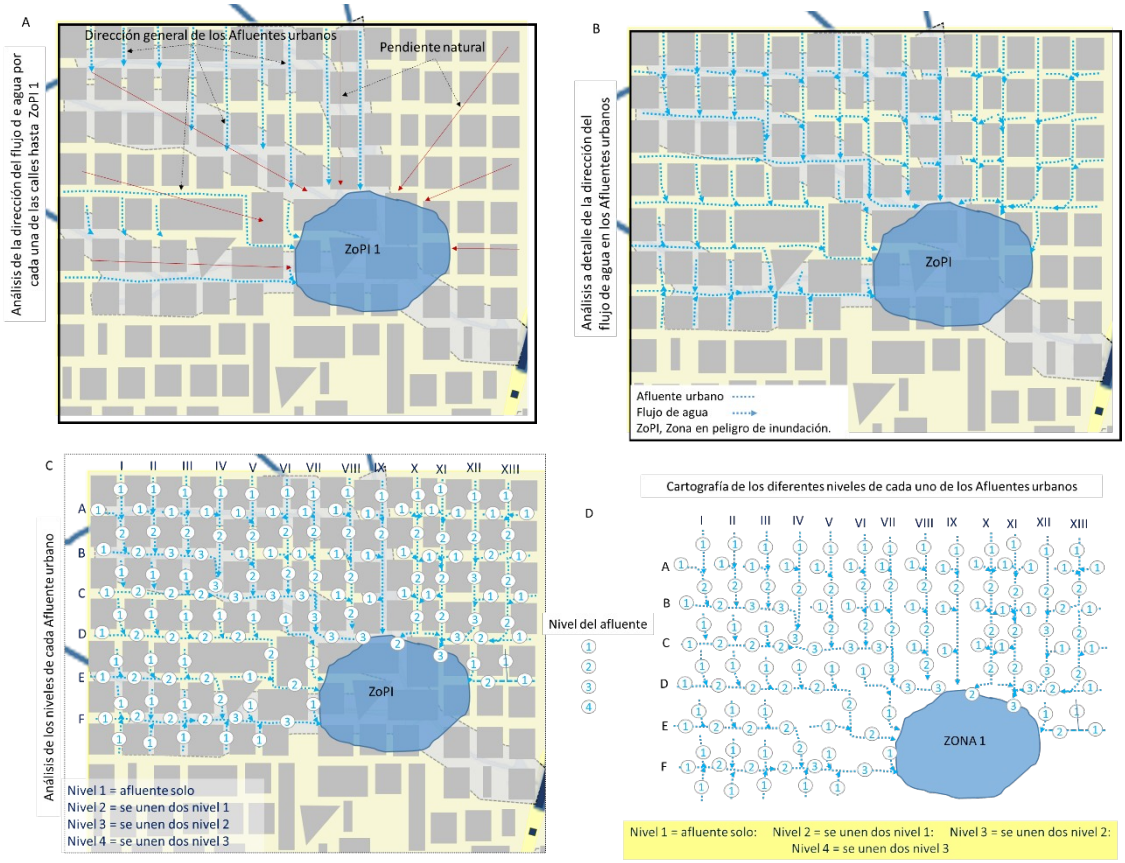


Figura 3.- Dibujos que representan una parte de la zona urbana donde hay una Zona en Peligro de Inundación (ZoPI 1). A) Representación general de la pendiente natural del terreno y la dirección de la corriente pluvial hacia ZoPI 1. B) Identificación detallada de la dirección que sigue el agua en cada Afluente urbano (calle). C) Análisis de los niveles de cada Afluente urbano Au1, Au2 y Au3, que descargan sus aguas hasta ZoPI 1. D) Representación de los Afluentes y sus niveles, sin las calles.

Un afluente Urbano (Au) es la calle por donde fluye el agua pluvial, el agua sigue la dirección de la pendiente de la vía de comunicación hasta llegar a otra calle, un cauce de río, un canal o una zona de inundación (Figura 4). A manera de ejemplo vamos hacer el análisis de la ZoPI 1 de nuestras ilustraciones (Figura 4). Un Afluente urbano puede ser; a) la calle donde el agua comienza su escurrimiento, b) la calle que recibe el agua que viene del cauce de un río, arroyo o canal natural que termina donde inicia la calle, o c) la calle que recibe el agua de otros afluentes urbanos.

5. Clasificación de los Afluentes Urbanos

Siguiendo la clasificación de los afluentes en una cuenca hidrológica [7], pero aplicada a una zona urbana tenemos que los Au se clasifican de la manera siguiente:

Afluente urbano nivel 1 (Au1). - Es el primer Au por donde comienza a escurrir el agua pluvial y que ahora corre por la superficie de la calle.

Afluente Urbano nivel 2 (Au2). – Es el Au que recibe el agua de la unión de dos Au de nivel 1. Un Au incrementa su nivel, sólo cuando recibe el agua de dos afluentes urbanos del mismo nivel. Como por ejemplo, si se unen dos afluentes de nivel 2 (Au2), aumentan su nivel a Au3; si se unen dos afluentes urbanos de nivel 3 (Au3), cambia a nivel 4 (Au4) (Figura 4).

Cuando se unen dos afluentes de diferente nivel, entonces el Au resultante mantendrá la clasificación del afluente de mayor nivel. Ejemplo, si se unen un afluente de nivel 1 (Au1) y un afluente de nivel 2 (Au2), el afluente resultante tendrá la clasificación del nivel 2 (Au2); si se une un afluente de nivel 1 (Au1) y un afluente de nivel 3 (Au3), el resultante tendrá una clasificación de nivel 3 (Au3) (Figura 4).

Zona de Peligro de Inundación (ZoPI).

La Zona de Peligro de Inundación (ZoPI) es el área donde el agua se acumula y provoca daños a la población, está delimitada por el perímetro que circunscribe el agua acumulada. Estas zonas pueden recibir el agua de uno o varios afluentes urbanos, con diferente nivel de clasificación.

6. Microcuenca Hidrográfica Urbana (MHU)

La Microcuenca Hidrográfica Urbana es la superficie por donde escurre el agua por los diferentes afluentes urbanos, hasta su descarga final.

La Microcuenca Hidrográfica Urbana podrá, o no, recibir el nombre de una calle, colonia o del afluente natural.

Para cada una de las MHU obtenidas, en la Carta Hidrográfica Urbana, se debe determinar su perímetro en metros lineales (m) y su superficie en metros cuadrados (m2). Tomando el registro de la precipitación de agua, altura de agua precipitada en un evento pluvial, se puede calcular el volumen de agua que escurre por cada MHU (Figura 4).

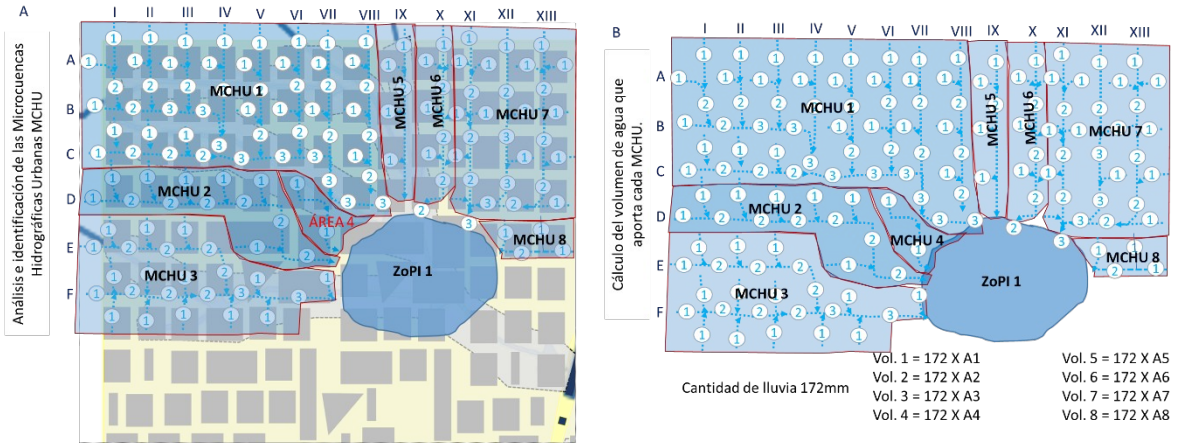


Figura 4.- A) Dibujo con los niveles de cada Afluente urbano y la delimitación de las áreas que conforman cada Microcuenca Hidrográfica Urbana (MCHU 1…. MCHU 8). B) Dibujo que ilustra como podemos calcular el volumen de agua que escurre en cada microcuenca, conociendo la cantidad de lluvia en la zona.

En la CHU se van a tener la dirección que sigue el agua por cada una de los afluentes, su interconexión y el nivel de agua que desfoga, en este caso en una zona de inundación, aunado al volumen de agua que aporta cada Microcuenca Hidrográfica Urbana.

7. Conclusión

Una Carta Hidrográfica Urbana es una herramienta que puede servir para alcanzar y lograr que una zona urbana sea mejor habitable, sustentable, que promueva y coadyuve con el desarrollo sostenible de sus habitantes, ya que permitirá, al ser utilizada, buenas prácticas de políticas públicas, estrategias, normas e instrumentos urbanos, en materia de desarrollo y mejoramiento, basados en la planeación estratégica.

La Carta Hidrográfica Urbana es una herramienta fundamental que permite:

- Identificar, dimensionar y proponer soluciones a los problemas urbanos, sobre todo lo relacionado con el fenómeno hídrico.

- Prever los requerimientos y normativas urbanas del futuro para el manejo y el uso de sus recursos naturales, principalmente el agua y los cambios de uso de suelo.

- Servir como una guía y una herramienta que oriente a las autoridades y particulares, para modificar la ciudad y su crecimiento con orden, sustentabilidad y sostenibilidad, cuidando y protegiendo a su población del incremento y la creación de zonas inundables.

- Cuidar que las nuevas construcciones no contribuyan a la carga vehicular, a la sobrecarga de los drenes pluviales y de aguas negras, y a la escorrentía superficial que pueda desencadenar en nuevas zonas de inundación.

La propuesta de que las zonas urbanas cuenten con su Carta Hidrográfica Urbana es con el principal objetivo de que se puedan realizar mejores programas de desarrollo urbano, ya que al tener representadas en la carta urbana la dirección que sigue el agua por sus calles, desde su origen hasta las zonas de inundación o desfogue, les va a permitir que las zonas de crecimiento no contribuyan con un mayor aporte de agua a esas zonas, no construir nuevas zonas de peligro de inundación e identificar los sitios donde deben de construir obras preventivas para impedir el flujo de agua; así como también les va a servir para realizar programas preventivos y disminuir los daños que las inundaciones provocan.

Bibliografía

1. ONU (2020). América Latina y el Caribe: la segunda región más propensa a los desastres naturales. Noticias 6 de enero 2020. (http://www.onu.org.mx/america-latina-y-el-caribe-la-segunda-region-mas-propensa-a-los-desastres-naturales/). Documento digital, recuperado 14 de marzo 2020.
2. Quarantelli, E. L. (1996). The future is not the past repeated: Projecting disasters in the 21st century from current trends. Journal of Contingencies and Crisis Management. https://doi.org/10.1111/j.1468-5973.1996.tb00097.

3. Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano: Problemas y conceptos. In Ciudades en riesgo.
4. Mansilla, E. (2010). Riesgo urbano y políticas públicas en América Latina: la irregularidad y el acceso al suelo. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction. ISDR, UNDP.
5. Robbins, C. H. (1984). Effects of Urbanization on the Magnitude and Frequency on Small Streams in Tennessee. January, 35.
6. Rey Valencia, D. M., y Zambrano, J. D. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palogrande. Revista UIS Ingenierías, 13(1), 115–126. https://doi.org/10.18273/revuin.v17n1-2018011
7. Mora, J. C. (2019). Mapping the Risk of Flood, Mass Movement and Local Subsidence. A New Proposal for Major Cities. (Springer Briefs in Earth Sciences. eBook (ed.)). Springer. https://doi.org/DOI 10.1007/978-3-030-22472-1.
8. Strahler, A. N. (1952), "Hypsometric (area-altitude) analysis of erosional topology", Geological Society of America Bulletin, 63 (11): 1117–1142, doi:10.1130/0016-7606(1952)63[1117:HAAOET]2.0.CO;2.

Identificación y análisis de Microcuencas Hidrográficas en zonas urbanas en riesgo de inundación

Mora, J. C[1]., Hernández, E. E[2]., y Mora, L.L[3].

1 Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Geofísica. Unidad Morelia.

2 Posgrado Escuela Nacional de Protección Civil, Campus Chiapas.

3 Programa jóvenes construyendo el futuro, Chiapas. *Responsable: jcmora@geofisica.unam.mx; elizabetha1708@gmail.com; luis.mora.krz@gmail.com.

1. Resumen

El desarrollo urbano se inicia en los valles al lado de los ríos, en busca de la satisfacción del recurso agua. Estos ríos son parte de una cuenca hidrológica, formada por las subcuencas y microcuencas de los afluentes, que descargan sus aguas al mismo.
El crecimiento poblacional va acompañado de la tala inmoderada y del cambio de uso de suelo de bosque a agrícola, hasta llegar a suelos urbanos. Todo esto hace incrementar de forma exponencial el agua que escurre y disminuir, de igual manera, el agua que se filtra en estos terrenos. Las microcuencas que solo tenían suelos naturales, (Microcuencas Hidrográficas Naturales) ahora han cambiado a suelos urbanos (Microcuencas Hidrográficas en zonas urbanas; MCH), o suelos urbanos y remanentes naturales. El origen del agua que llega a las zonas en riesgo de inundación de las zonas urbanas, proviene de la escorrentía solo en zonas urbanas (MCH) o escorrentía de las zonas remanentes naturales que continua en la zona urbana. Al identificar el origen del agua en las zonas en riesgo de inundación, es factible localizar los sitios para desviar la misma o para construir obras de retención, zonas de inundación provocada o zonas de filtración, y con ello disminuir los daños que provocan a la población expuesta.
En Tuxtla Gutiérrez existían 33 Microcuencas Hidrográficas que fueron transformadas a Zonas Hidrográficas Urbanas (12) y microcuencas que tienen Zonas Hidrográficas Urbanas y Zonas Hidrográficas Naturales (21). En Tuxtla Gutiérrez se identificaron en riesgo de inundación 88

colonias con 58 888 viviendas (vulnerabilidad física expuesta) y 70 980 personas expuestas (vulnerabilidad social expuesta).

2. Introducción

Las zonas urbanas, en general, se han establecido en una cuenca o subcuenca hidrológica con una red hidrográfica natural, los ríos principales reciben el agua de sus diferentes afluentes y para cada afluente existe una microcuenca. Las cuencas, subcuencas y microcuencas donde se han establecido zonas urbanas han sufrido una drástica y acelerada transformación, lo que ha traído como consecuencia diferentes afectaciones tanto en su superficie como en el subsuelo. Éstas son causadas principalmente por la deforestación y el recubrimiento de los suelos con asfalto y cemento, que ha convertido los suelos naturales permeables en suelos impermeables, lo que ha dado origen a una fuerte disminución de la filtración del agua en el subsuelo y al incremento exponencial del agua de escorrentía. Lo anterior ha provocado el desbordamiento de los ríos y afluentes, además del incremento del agua que escurre por las calles, las cuales se convierten en ríos que al llegar a las zonas más bajas y provocan severas inundaciones con numerosos e incuantificables daños, a la actividad económica y social donde se presentan.

El incremento de la escorrentía y la disminución de la infiltración de agua en el subsuelo ha llevado a la erosión y desertificación de los suelos naturales y a la disminución en la recarga de los mantos acuíferos. Las consecuencias de estas alteraciones del ciclo natural se han traducido en el constante incremento de la construcción social de las zonas en riesgo de inundación, la escasez de agua, erosión y la desertificación de los suelos, así como del incremento de la temperatura en las zonas urbanas.

Las zonas urbanas, en su mayoría, comenzaron su desarrollo en el valle, a los lados del cauce del río principal, este río recibe el aporte de agua por medio de sus afluentes que vienen de las partes topográficas más altas. El crecimiento subsecuente del área urbana se ha dado a su alrededor, y poco a poco fue incursionando hacia las zonas medias y altas. Durante este crecimiento los cauces tanto de los afluentes como del río principal, han sido entubados, embovedados o convertidos en canales a cielo abierto; en general, se ha reducido su área hidráulica original y otros han pasado a ser calles asfaltadas o pavimentadas. Esto ha generado la transformación de la Red Hidrográfica Natural en una nueva Red Hidrográfica Urbana y, por consiguiente, en la conformación de Microcuencas Hidrográficas Urbanas y Microcuencas Hidrográficas Mixtas.

El presente estudio se realizó en la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez, Chiapas como un ejemplo de cómo a través de la caracterización del flujo de agua por las calles en las zonas urbanas se pueden identificar y delimitar Microcuencas Hidrográficas Urbanas compuestas por Zonas Hidrográficas Urbanas y Zonas Hidrográficas Naturales, como una herramienta para una mejor Gestión del Riesgo de Desastres por Inundaciones y para el desarrollo de mejores Planes de Desarrollo Urbano Sustentable y Sostenible.

3. Antecedentes

Autores[1] [2] evidenciaron que los actuales procesos de urbanización e industrialización generan mayores riesgos en las ciudades.

En el 2006 [3] menciona que el crecimiento urbano en los países en desarrollo se ha dado de manera insustentable, con deterioro de la calidad de vida y del medio ambiente.

En 2008 [4] describe que el número de eventos ha crecido a una velocidad vertiginosa, particularmente en áreas urbanas, impactando de manera negativa el funcionamiento normal de los sectores social, de servicios, económico y financiero, entre otros, dejando en mayor vulnerabilidad a la población con menos recursos.

En 2010 [5] reflexiona sobre el riesgo en el ámbito urbano y plantea que los elevados índices de vulnerabilidad y las condiciones de marginalidad son un factor determinante.

En el año 2018 [6] mencionan que la urbanización ha modificado considerablemente los ciclos naturales en las cuencas hidrológicas con el constante cambio de uso del suelo, en el que existe un aumento del área impermeabilizada y una disminución o eliminación de la cobertura vegetal.
En el 2019 [7] presenta nuevas metodologías para realizar un mapeo específico de los niveles de inundación en zonas urbanas, además de cómo contabilizar y registrar la vulnerabilidad física y social expuesta en las mismas.

4. Resultados y discusión

El presente estudio se llevó a cabo en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, la cual se ubica en la parte central del estado de Chiapas y se asienta en el valle de la subcuenca del río Sabinal (Figura 1).

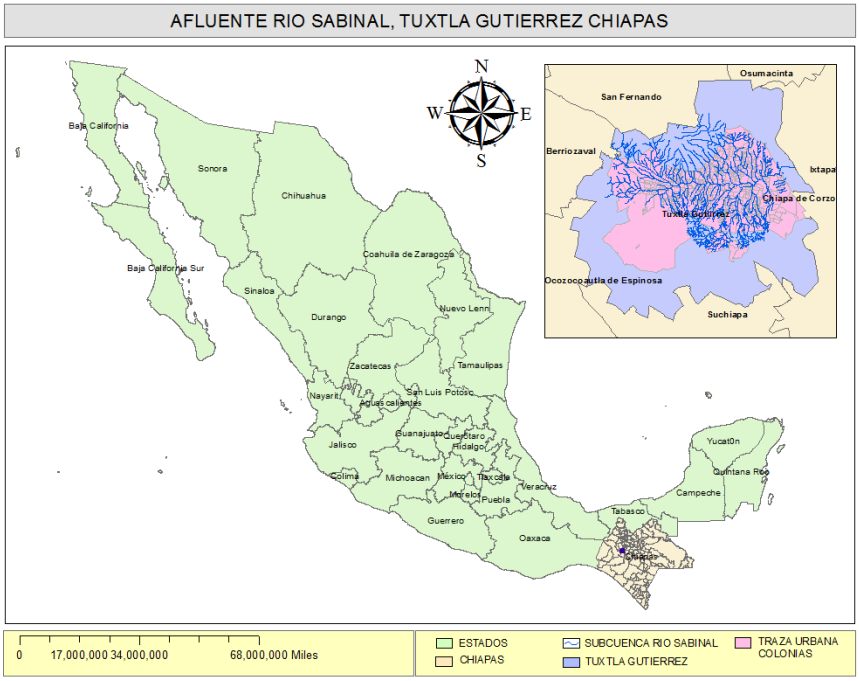


Figura 1. Mapa con la localización de la Subcuenca del río Sabinal en el municipio de Tuxtla Gutiérrez en el estado de Chiapas y la República Mexicana.

El crecimiento urbano se inició en el valle del río Sabinal y poco a poco se fue extendiendo hacia las zonas altas. Las inundaciones registradas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez se han generado por el desbordamiento del río Sabinal y sus afluentes y, principalmente, por la acumulación del agua que escurre por sus calles, en donde se acumula y ocasiona severos daños.
En Tuxtla Gutiérrez se han emitido siete declaratorias de emergencia y desastre desde 1999 hasta 2017 [8], debido a las lluvias severas que han provocado las.
Con base en la topografía y las curvas de nivel se delimitó el parte aguas para cada uno de los afluentes que llegan al río Sabinal, identificando 33 Microcuencas Hidrográficas (MCH). En cada microcuenca se delimito el área ocupada por las construcciones y se denominó, Zona Hidrográfica Urbana (ZHU) y el remanente natural, denominado Zona Hidrográfica Natural (ZHN) (Figura 2).

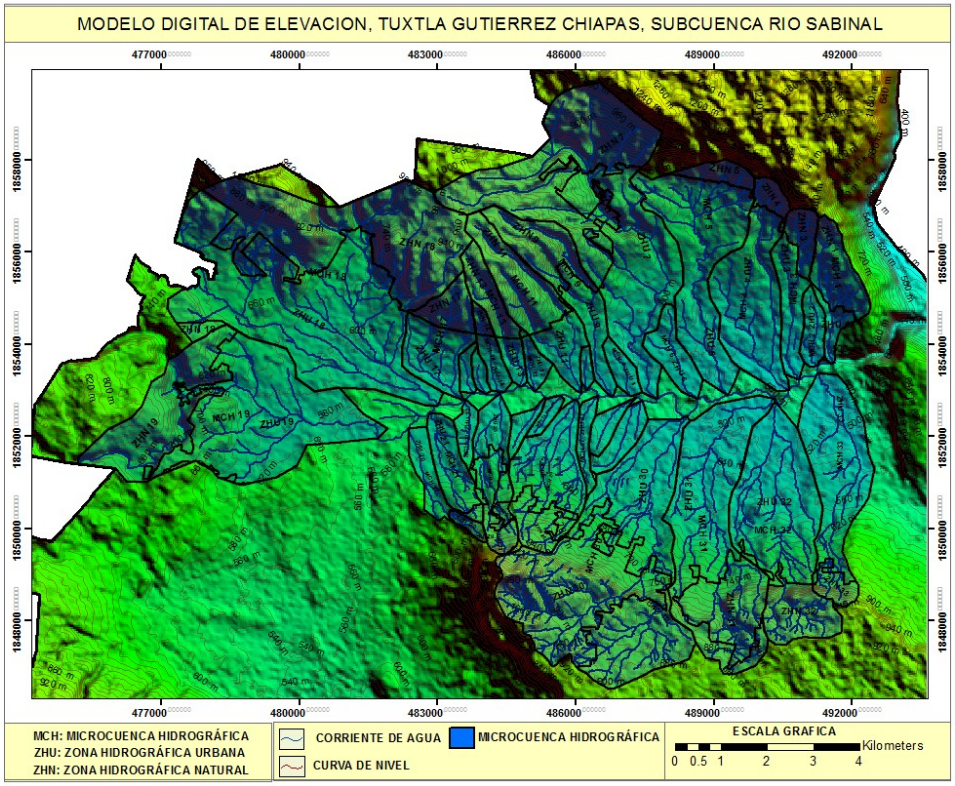


Figura 2. En esta imagen se observa la subcuenca del río Sabinal que atraviesa de poniente a oriente a la mitad de la imagen. Con línea de color negro se tienen delimitadas cada una de las 33 microcuencas (MCH 1- 33) de los afluentes que descargan sus aguas al río principal. Con líneas delgadas se representan las curvas de nivel y las diferencias de color verde a ocre la morfología.

El río Sabinal durante su trayecto recibe la descarga de las aguas de los afluentes, con sus respectivas microcuencas, que descienden de la parte norte (MCH1 hasta MCH 17) y también recibe el agua de los afluentes de la zona sur (MCH 20 hasta MCH 33).
En la Tabla 1 se tienen las 33 microcuencas con el área total, así como el área para cada una de las zonas (ZHN y ZHU) que las componen (Figura 2).

Tabla 1. Se presentan las 33 Microcuencas Hidrográficas (MCH) con su área (metros cuadrador, m2) y perímetro (metros, m). Cada MCH esta compuesta por una Zona Hidrográfica Natural (ZHN) y una Zona Hidrográfica Urbana (ZHU), también con los datos de su área y perímetro.

La componente urbana en las microcuencas nos índica el cambio de uso de suelo que han sufrido la

MICROCUENCAS HIDROGRÁFICAS DE TUXTLA GUTIERREZ, CHIAPAS

Abreviaciones: MCH= Microcuenca Hidrográfica; ZHU= Zona HIidrográfica Urbana; ZHN= Zona Hidrográfica Natural; HA= Hectáreas =10 000 m2; M= Metros.

MCH		MCH AREA (HA)	ZHU AREA (HA)	ZHN AREA (HA)	MCH PERIMETRO (M)	ZHU PERIMETRO (M)	ZHN PERIMETRO (M)
MCH1	Patria Nva. Norte	213	51	162	7438	4774	6085
MCH2	Microcuenca Hidrográfica 2	72	72	0	4040	4040	0
MCH3	Arroyo Blanco	220	145	74	8463	7306	4175
MCH4	24 de junio	480	430	49	11313	10709	3766
MCH5	Arroyo Totoposte	618	554	64	14279	13939	4920
MCH6	Microcuenca Hidrográfica 6	116	116	0	5231	5231	0
MCH7	Potinaspak	1342	584	758	21709	24478	27456
MCH8	Microcuenca Hidrográfica 8	53	53	0	3279	3279	0
MCH9	Pomarrosa	322	130	192	11204	7516	8585
MCH10	Microcuenca Hidrográfica 10	21	21	0	2167	2167	0
MCH11	Rosario Poniente	349	117	232	10086	6123	7853
MCH12	Microcuenca Hidrográfica 12	46	44	2	3264	2986	656
MCH13	Ojo de Agua	155	44	110	7276	2964	5451
MCH14	Laguitos	76	55	21	4672	3338	2147
MCH15	Laguitos 2	25	25	0	2412	2412	0
MCH16	Microcuenca Hidrográfica 16	29	29	0	2791	2791	0
MCH17	San José	271	175	96	7310	5975	4572
MCH18	Chacona y San Agustin	2096	1216	881	24129	27531	49800
MCH19	Microcuenca Hidrográfica 19	1225	800	425	16692	21252	21100
MCH20	Microcuenca Hidrográfica 20	113	91	22	6975	6103	2761
MCH21	La Laguna	146	135	12	5873	5470	1877
MCH22	Microcuenca Hidrográfica 22	47	47	0	3486	3486	0
MCH23	Microcuenca Hidrográfica 23	236	120	116	7901	12330	9742
MCH24	Microcuenca Hidrográfica 24	41	41	0	3525	3525	0
MCH25	Microcuenca Hidrográfica 25	30	30	0	2679	2679	0
MCH26	El Cocal	374	277	97	8274	11384	7318
MCH27	Romeo Rincón	56	56	0	4837	4837	0
MCH28	Microcuenca Hidrográfica 28	50	50	0	3552	3552	0
MCH29	Microcuenca Hidrográfica 29	84	84	0	4496	4496	0
MCH30	San Roque	1406	763	644	18393	28307	21351
MCH31	Poc-Pon	890	624	266	15679	22290	10019
MCH32	Ana y Cerro Hueco	736	548	188	13258	12044	9330
MCH33	Patria Nueva Sur	495	438	56	11861	12644	4093

subcuenca y las microcuencas hidrográficas por el acelerado crecimiento poblacional y urbano. Este fenómeno de crecimiento de las zonas más bajas hacia las zonas altas de las cuencas, subcuencas y microcuencas ha provocado el desequilibrio natural en todo el sistema y, principalmente, en el

ciclo de filtración y escurrimiento del agua, ya que favorece la disminución del primero y el incremento exponencial del segundo.

Tabla 2. Se presenta cada una de las 33 MCH con las zonas por colonia en peligro de inundación y con el registro de la Vulnerabilidad Física Expuesta (Viviendas) y la Vulnerabilidad Social Expuesta (población).

Identificar las condiciones en las que actualmente se encuentran cada una de las microcuencas y

Microcuencas Hidrográficas y vulnerabilidad física y social expuesta

Microcuenca hidrográfica	Colonias	Viviendas	Población
MCH 4	24 DE JUNIO	138	425
	EL BOSQUE	40	139
	GRIJALVA INFONAVIT	212	649
MCH 6	MADERO	109	289
MCH 7	GUADALUPE	368	1052
	POTINASPAK	227	750
	COL 42	119	220
	LINDA VISTA SHANKÁ	253	995
	NIÑO DE ATOCHA	201	590
	SANTO DOMINGO	76	217
	COLON	146	392
MCH 8	NIÑO DE ATOCHA	201	590
	COLON	146	392
	GUADALUPE	368	1052
MCH 9	COLON	146	392
	POMAROSA	109	469
	GUADALUPE	368	1052
MCH 15	RINCON DE LOS LAGOS	60	189
MCH 17	SAN ISIDRO BUENAVISTA 2	72	219
	SAN ISIDRO BUENAVISTA	196	538
	SAN JOSÉ YEGUISSTE	173	588
	SAN ISIDRO	156	444
	SAN MARTIN	67	161
	ATENAS	63	208
	JARDINES DE TUXTLA	102	260
	JARDÍN CORONA FOVISSSTE 2	468	1479
	LUMHA	217	596
	VILLAS DEL RIO	272	762
	LOS LAURELES	620	1848
MCH 18	LOS LAURELES	620	1848
	ARAMONI	76	224
	CATAZAJA	76	224
MCH 19	FLAMINGOS	348	1006
	ZAVALETA	30	95
	HERRADURA	186	532
	LA GLORIA 2	28	76
	SAN JOSÉ TERÁN	282	1011
	ROSARIO SABINAL	91	227
	PLAN DE AYALA	67	222
	EL TRIUNFO	265	905
	CAMPANARIO	36	120
	TERAN	3195	10106
MCH 20	TERAN	3195	10106
	LA RELIQUIA 2	300	1088
	LA RELIQUIA 3	56	188
	LOMA VERDE	31	131
	SOLIDARIDAD CHIAPANECA	186	618
	VILLAS BUENA VENTURA	57	247
	FOVISSSTE 3	193	572
	LOMA BONITA	57	247
MCH20	EL CIPRES	460	1322
	AMPLIACION EL PUENTE	36	135
	EL PRIVILEGIO	40	124
	BELISARIO DOMINGUEZ	385	1256
	BELLAVISTA	266	775
	COLINAS DE BELLAVISTA	193	492
	LA RELIQUIA	839	3034
	LINDA VISTA	202	644
	NUEVA ESPERANZA	181	568
	SOLIDARIDAD INFONAVIT	258	853

Microcuenca hidrográfica	Colonias	Viviendas	Población
MCH 20	TERAN	3195	10106
	LA RELIQUIA 2	300	1088
	LA RELIQUIA 3	56	188
	LOMA VERDE	31	131
	SOLIDARIDAD CHIAPANECA	186	618
	VILLAS BUENA VENTURA	57	247
	FOVISSSTE 3	193	572
	LOMA BONITA	57	247
MCH20	EL CIPRES	460	1322
	AMPLIACION EL PUENTE	36	135
	EL PRIVILEGIO	40	124
	BELISARIO DOMINGUEZ	385	1256
	BELLAVISTA	266	775
	COLINAS DE BELLAVISTA	193	492
	LA RELIQUIA	839	3034
	LINDA VISTA	202	644
	NUEVA ESPERANZA	181	568
	SOLIDARIDAD INFONAVIT	258	853
MCH 21	BELLAVISTA	266	775
	NUEVA ESPERANZA	181	568
	LINDA VISTA	202	644
	LOS TAMARINDOS	97	240
	AMPLIACION TERAN	796	2687
	ALIANZA CAMPESINA	17	56
	MACTUMATZA	135	429
	MACTUMATZA 2	167	554
	PRIVADA FLAMBOYANT	61	183
	BUENOS AIRES	229	638
	BUENA VISTA	196	693
	SIGLO XXI FOVISSSTE	215	710
	SOLIDARIDAD INFONAVIT	258	853
MCH26	SAN JOSE LIBRAMIENTO	6	19
	PENIPAK	83	248
	BELEN	2	14
	LA GLORIA	245	672
MCH 28	GUADALUPE	368	1052
MCH 29	GUADALUPE	368	1052
	SANTO DOMINGO	76	217
MCH 30	POPULAR	51	153
	POTRERO MIRADOR	19	88
	SAN MARCOS	65	191
	JOYAS DEL ORIENTE	10	38
	MADERO	109	289
MCH 31	EL VERGEL	248	772
	EMILIANO ZAPATA	76	286
	MEXICANIDAD CHIAPANECA	109	289
	HIDALGO	90	317
	LAS FLORES	102	352
	EL BRASILITO	152	537
	CAMINERA	134	398
	BIENESTAR SOCIAL	125	397
MCH 32	BIENESTAR SOCIAL	125	397
	EL BRASILITO	152	537
	LAS PALMAS	187	551
MCH 33	LOMAS DEL ORIENTE	948	3284
	LAS TORRES	138	353
	LA ILUSIÓN	270	814
	LA MISIÓN	80	252
	COL 24	151	514
	CUEVAS DEL JUAGAR	235	640
	6 DE JUNIO 1	105	393
	6 DE JUNIO 2	86	325

cauces naturales, los usos del suelo y su transformación con el desarrollo urbano, nos permite identificar el curso y la dirección que sigue el agua hasta su descarga final, ya sea al cauce del río principal o a la zona urbana afectada por la inundación.

El análisis de las Zonas Hidrográficas Naturales y las Zonas Hidrográficas Urbanas que componen cada microcuenca y su relación con las zonas afectadas por inundación nos permite conocer la influencia de cada microcuenca, su transformación y el origen del agua que llega a las zonas afectadas.

En Tuxtla Gutiérrez se identificaron en riesgo de inundación 88 colonias con 58 888 viviendas (vulnerabilidad física expuesta) y 70 980 personas expuestas (vulnerabilidad social expuesta) al peligro por inundación (Tabla 2). Estas Zonas en Riesgo de Inundación se presentan en 21 microcuencas de las 33 identificadas en este estudio.

5. Conclusiones

El crecimiento urbano conlleva cambios drásticos de uso de suelo y de la red hidrográfica natural, genera un desequilibrio en el ciclo del agua donde se incrementa de forma exponencial la escorrentía, se inhibe la filtración de agua con la deforestación excesiva y la impermeabilización de los terrenos al ser cubiertos por asfalto, pavimento y empedrados. El crecimiento ha llevado a la construcción social del riesgo y al fomento del desarrollo sin sustentabilidad y sin sostenibilidad en los valles, zonas medias y altas de las cuencas, subcuencas y microcuencas hidrológicas.

Las cuencas, subcuencas y microcuencas naturales san sido invadidas y se ha alterado la red hidrográfica natural, los cauces de los ríos y afluentes han sido modificados y reducidos, algunos se han entubado, embovedados y otros han pasado directamente a ser calles, los cuales determinan una nueva red hidrográfica en la zona urbana: Estos cambios deben de ser identificados y delimitados, para entender porque las calles se convierten en ríos que conducen el agua hasta las zonas más bajas, donde las descargan y provocan severas inundaciones.

En este trabajo se obtuvieron las Microcuencas Hidrográficas que se relacionan con la zona urbana de Tuxtla Gutiérrez Chiapas, en donde cada una, en la actualidad, se compone de una o dos zonas por donde escurre el agua hasta el río principal; una zona natural, que corresponde a el área natural remanente, identificada como Zona Hidrográfica Natural (ZHN), y una zona urbana, que corresponde a la zona invadida por las construcciones urbanas, denominada aquí como Zona Hidrográfica Urbana (ZHU).

En Tuxtla Gutiérrez Chiapas existían 33 microcuencas hidrográficas naturales, las cuales han sufrido cambios en el uso del suelo de bosques, agrícolas hasta urbanos, en algunos casos, hasta del 100%. Esto provocó cambios en el régimen hidrológico que ahora se manifiesta con un mayor volumen de agua que escurre y que ha generado numerosas zonas en riesgo de inundación en la mayoría de las Microcuencas Hidrográficas. Este cambio ha generado que el agua de escorrentía siga la pendiente y la dirección de las calles, que en conjunto siguen el flujo vehicular hacia las calles principales. En ocasiones, esto genera que el volumen de agua se acumule en estas últimas y se convierta en ríos caudalosos.
El trabajo consistió en identificar la dirección del flujo de agua por cada una de las calles en cada microcuenca, su intersección con otras calles, con canales o cauces de ríos que atraviesan la zona urbana. El levantamiento se llevó a cabo en campo y permitió delimitar las nuevas Microcuencas Hidrográficas Urbanas y su red hidrográfica y las áreas que aportan el agua a cada una de las zonas en peligro de inundación. Con los datos anteriores se realizaron mapas para cada una de las Microcuencas Hidrográficas Urbanas delimitadas.
Esperemos que, con los mapas generados con la dirección del flujo de agua en cada Microcuenca Hidrográfica Urbana y con las áreas de recarga a las zonas de inundación, sirvan de base para identificar sitios estratégicos para la desviación del flujo de agua, retención y retardo del agua que llega a las calles y sitios o zonas estratégicas para inundaciones provocadas o inducidas que pueden ser jardines, parques, campos, baldíos u otros.
También con los resultados de este estudio las autoridades pueden desarrollar o proponer las nuevas zonas de crecimiento urbano sin que se incrementen las zonas de inundación existentes, se conserven los suelos naturales remanentes, se promueva la no construcción social del riesgo y se promueva el desarrollo sustentable y sostenible.

6. Bibliografía

1. Quarantelli, E. L. (1996). The future is not the past repeated: Projecting disasters in the 21st century from current trends. Journal of contingencies and crisis management, 4(4), 228-240.
2. Lavell, A. (1996). Degradación ambiental, riesgo y desastre urbano. Problemas y conceptos: hacia la definición de una agenda de investigación. Fernández, AM (comp.), Ciudades en Riesgo-Degradación Ambiental, Riesgos Urbanos y Desastres, La Red, Lima.
3. Morelli Tucci, C. E., (2006). Curso de gestión de inundaciones urbanas. Porto Alegre-RS -Brasil: Secretaría de la Organización Meteorológica Mundial.
4. Benjamín, M. (2008). Investigating physical and social dimensions. MSc thesis. Cape Town, South Africa: University of Cape Town.
5. Mansilla, Elizabeth (2010). Riesgo urbano y políticas públicas en América Latina: la irregularidad y el acceso al suelo. Global Assessment Report on Disaster Risk Reduction 2011, ISDR y UNDP.
6.- Rey-Valencia, D., y Zambrano, J. (2018). Estudio de la respuesta hidrológica en la cuenca urbana de montaña San Luis-Palo grande. Revista UIS Ingenierías [en línea] 2018, 17 (January-June): [Fecha de consulta: 10 de julio de 2019] Disponible en:<http://4www.redalyc.org/articulo.oa?id=553756967012> ISSN 1657-4583.
7. Mora, J. C. (2019). Mapping the Risk of Flood, Mass Movement and Local Subsidence. A New Proposal for Major Cities. Springer Briefs in Earth Sciences. eBook ISBN 978-3-030-22472-1 DOI 10.1007/978-3-030-22472-1. XIX, 58p.
8. Protección Civil (2018). Reportes inéditos, Secretaría de Protección Civil del Municipio de Tuxtla Gutiérrez, de las inundaciones desde el año 2005 hasta el 2018.

Programación cuadrática y cómputo paralelo aplicados al control puntual de emisiones contaminantes

Daniel Peña-Maciel[1], David Parra-Guevara[2]

[1]Posgrado en Ciencias de la Tierra, Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

[2]Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

dpmaciel@atmosfera.unam.mx, pdavid@atmosfera.unam.mx

1. Resumen

En este trabajo se formula un modelo de programación cuadrática para calcular los coeficientes óptimos que deben regular las emisiones de fuentes contaminantes. El objetivo es disminuir la concentración de una sustancia en todos los puntos de una zona de control y en cualquier momento dentro de cierto intervalo de tiempo, a fin de satisfacer la norma de la calidad del aire respectiva a un costo mínimo. Se considera un modelo lineal de dispersión de contaminantes en la atmósfera que está bien formulado, cuyas soluciones particulares se utilizan para definir las restricciones en el problema de optimización, mientras que la función objetivo se define por el costo que las fuentes pagan por disminuir sus emisiones. La formulación permite emplear cómputo paralelo para calcular dichas soluciones particulares, lo cual mejora el tiempo de cómputo necesario para implementar dicha estrategia de control de corto plazo. Se presenta un ejemplo sintético de control.

2. Introducción

La contaminación del aire en zonas urbanas es un problema de gran preocupación debido al deterioro en la calidad de vida de la población que está expuesta a altas concentraciones de los contaminantes. Por ello, durante las últimas décadas se han propuesto diversas estrategias para el control de la contaminación del aire que se basan en modelos de optimización [1,2]. Los diversos factores que influyen en el problema de la contaminación del aire hacen que los modelos de control que se han desarrollado resuelvan sólo situaciones específicas, por lo que éstos consideran diferentes clases de metas ecológicas y económicas. En particular, ante un evento de corto plazo (cuya duración va de pocas horas a varios días), donde una débil dispersión en la atmósfera favorece la acumulación de los contaminantes hasta niveles peligrosos, es necesario definir con prontitud las restricciones en las emisiones que pueden mantener las concentraciones de los contaminantes por debajo de las normas sanitarias respectivas [3]. Por otra parte, es importante notar que las computadoras son esenciales en el planteamiento y desarrollo de algunos de dichos modelos de optimización, los cuales permiten controlar los niveles de contaminación en el aire; en este sentido, las llamadas computadoras paralelas, ejecutan múltiples tareas simultáneamente y resuelven problemas más grandes en menos tiempo [4]. En este trabajo se formula un modelo de programación cuadrática que permite calcular los coeficientes de amortiguamiento óptimos que han de regular las emisiones a corto plazo de fuentes contaminantes al costo más bajo. El objetivo es disminuir la concentración de un contaminante en todos los puntos de una zona específica y en

cualquier momento del intervalo de tiempo de control, a fin de satisfacer la norma de la calidad del aire. Las soluciones del modelo de dispersión calculadas independientemente para cada fuente tienen un papel importante en la determinación de esta estrategia de control, por ello, con el acceso a un sistema de cómputo paralelo, dicha estrategia permite aprovechar múltiples unidades de procesamiento para resolver varios modelos de dispersión de forma casi simultánea y así, obtener rápidamente los coeficientes óptimos que deben regular las emisiones. Éste es el procedimiento computacional que se destaca en este trabajo de investigación.

3. Descripción del modelo de dispersión

A continuación, se describe un modelo que es posible utilizar para predecir la dispersión de una sustancia emitida desde varias fuentes contaminantes [5]. Sea $\phi(\mathbf{r},t)$ la concentración de un contaminante en el punto $\mathbf{r}$ de una región $\mathbf{D}$ al tiempo t. La región $\mathbf{D}=D\times(0,H)$ es un dominio acotado tridimensional con frontera abierta $\partial\mathbf{D}=S_0 \cup S \cup S_H$, la cual es la unión de la superficie lateral cilíndrica S, la base S_0 en el fondo y la cubierta S_H en $z=H$. Se denotan por $\mathbf{r}_i(x_i,y_i,z_i) \in \mathbf{D}$, los puntos donde se ubican las N fuentes que emiten un contaminante y se supone que la región $\mathbf{D}$ contiene a todas las fuentes de emisión, por lo tanto, no habrá contribuciones externas a la contaminación dentro del dominio. La dispersión del contaminante en la atmósfera se describe mediante el siguiente sistema diferencial:

$$\frac{\partial\phi}{\partial t}+A\phi=\frac{\partial\phi}{\partial t}+\mathbf{U}\cdot\nabla\phi+\sigma\phi-\nabla\cdot(\mu\nabla\phi)-\frac{\partial}{\partial z}\upsilon\frac{\partial\phi}{\partial z}+\nabla\cdot\vec{\phi}^{s}=f(\mathbf{r},t)\quad \text{en } \mathbf{D} \tag{1}$$

$$\phi(\mathbf{r},0)=\phi^{0}(\mathbf{r})\ \text{ en } \mathbf{D} \tag{2}$$

$$\vec{\phi}^{s}=-\nu^{s}\phi\vec{e}_{3}\ \text{ en } \mathbf{D} \tag{3}$$

$$\upsilon\frac{\partial\phi}{\partial z}-U_{n}\phi=-\nu^{s}\phi\ \text{ en } S_{H}^{-},\quad \upsilon\frac{\partial\phi}{\partial z}=-\nu^{s}\phi\ \text{ en } S_{H}^{+} \tag{4}$$

$$\mu\nabla\phi\cdot\vec{n}-U_{n}\phi=0\ \text{ en } S^{-},\quad \mu\nabla\phi\cdot\vec{n}=0\ \text{ en } S^{+} \tag{5}$$

$$\mu\nabla\phi\cdot\vec{n}=0\ \text{ en } S_{0} \tag{6}$$

$$\nabla\cdot\mathbf{U}=\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0\ \text{ en } \mathbf{D} \tag{7}$$

Se asume que la velocidad del viento $\mathbf{U}(\mathbf{r},t)$ en $\mathbf{D}$ cumple la ecuación de continuidad (7).

En (1), $\sigma(\mathbf{r},t) \geq 0$ es el coeficiente de transformación química del contaminante y $\widehat{\mu}(\mathbf{r},t) = \text{diag}\{\mu, \mu, \upsilon\}>0$ es la matriz de difusión turbulenta, mientras que el término $\text{div}\{\phi \vec{v}^{s}\}$ describe el cambio en la concentración de las partículas por unidad de tiempo debido a la sedimentación, la cual está caracterizada por una velocidad constante de sedimentación $v^s > 0$. La ecuación (2) define a $\phi^0(\mathbf{r})$ como la distribución espacial del contaminante al tiempo $t = 0$ sobre $\mathbf{D}$. La frontera $\partial\mathbf{D}$ se ha dividido en cinco partes: dos para el flujo horizontal, es decir, S^+ se define como los puntos de S tal que $U_n = \mathbf{U} \cdot \vec{n} > 0$, donde $\vec{n}$ es el vector normal exterior y S^- se define como el complemento ($U_n = \mathbf{U} \cdot \vec{n} \leq 0$); dos secciones para la frontera superior: S^-_H es la frontera donde la sedimentación es el resultado de la difusión menos la advección y, S^+_H implica que la sedimentación es igual a la difusión (ecuación 4); en la frontera inferior S_0, se tiene que la difusión es cero debido a que el flujo es tangente a la superficie irregular (ecuación 6). Por último, se asume que el forzamiento en (1),

$$f(\mathbf{r},t) = \sum_{j=1}^{N} f_j(\mathbf{r},t) \tag{8}$$

está formado por fuentes de emisión puntuales, de línea o área $f_j(\mathbf{r},t)$ [2]. En particular, cuando una fuente es puntual, $f_j(\mathbf{r},t) = Q_j(t)\,\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_j)$, donde la función delta es la medida de Dirac si $\delta(\mathbf{r}-\mathbf{r}_j)=1$ cuando $\mathbf{r}=\mathbf{r}_j$ e indica el punto de emisión $\mathbf{r}_j$ de la fuente contaminante, mientras que $Q_j(t)$ denota la tasa de emisión respectiva.

Las condiciones de frontera (4)-(6) hacen del modelo de dispersión un problema bien formulado en el sentido de Hadamard, es decir, la solución de dicho problema es única y estable respecto de pequeñas perturbaciones en las condiciones iniciales y del forzamiento. Este resultado es consecuencia de que el operador A en la ecuación (1), es positivo semidefinido [5]: $(A\phi,\phi) \geq 0$, donde $(\phi,\eta) = \int_{\mathbf{D}} \phi\, \eta\, d\mathbf{r}$ es el producto interior. De aquí se sigue la estimación que establece la unicidad y la estabilidad de la solución del modelo (1)-(7):

$||\phi|| \leq T \max_{0\leq t\leq T} || f(\mathbf{r},t) ||+|| \phi^0||$, con $||\phi||_2 = (\int_{\mathbf{D}} \phi^2\, d\mathbf{r})^{1/2}$.

4. Formulación y análisis del modelo de programación cuadrática

Para simplificar el planteamiento de la estrategia de control, el modelo de dispersión (1)-(7) se escribe en la forma

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + A\phi = f(\mathbf{r},t), \quad \phi(\mathbf{r},0) = \phi^0(\mathbf{r}) \text{ en } \mathbf{D} \tag{9}$$

Donde el operador lineal *A* incluye los procesos físicos y químicos, así como las respectivas condiciones de frontera descritos para el modelo (1)-(7) y $f(\mathbf{r},t)$ está dado por (8).

Se asume que el pronóstico de la concentración de un contaminante en la región **D** obtenido mediante el modelo (9) es desfavorable durante el intervalo de tiempo $(0,T)$, es decir, la concentración $\phi(\mathbf{r},t)$ excede la norma de la calidad del aire J_0 en algunos puntos dentro de la zona Ω contenida en **D**. Esto como una consecuencia de la mala dispersión atmosférica y la intensidad de las emisiones. Así, para evitar una concentración excesiva del contaminante en la zona Ω, se debe aplicar un control a corto plazo con el objeto de establecer una intensidad adecuada de todas las fuentes de contaminación dentro del intervalo $(0,T)$, de manera que se cumpla la norma de la calidad del aire:

$$\phi(\mathbf{r},t) \le J_0, \quad \text{para todo } \mathbf{r} \in \Omega \quad \text{y} \quad t \in (0,T) \tag{10}$$

De esta forma, el problema de control de emisiones consiste en hallar los parámetros λ_i

$(0 \le \lambda_i \le 1)$ tal que con las emisiones corregidas $\lambda_i f_i$, la nueva función de concentración φ cumpla la norma de la calidad del aire.

$$\varphi(\mathbf{r},t) \le J_0, \ (\mathbf{r},t) \in \Omega \times (0,T) \tag{11}$$

Note que el porcentaje de reducción para la *i*-ésima fuente de contaminación es $(1-\lambda_i) \times 100$.

En la ecuación (11) $\varphi(\mathbf{r},t)$ es la solución del siguiente problema de dispersión

$$\frac{\partial \varphi}{\partial t} + A\varphi = \sum_{i=1}^{N} \lambda_i f_i(\mathbf{r},t), \quad \varphi(\mathbf{r},0) = \phi^0(\mathbf{r}) \text{ en } \mathbf{D} \tag{12}$$

Además, ya que el modelo de dispersión (1)-(7) es lineal y tiene solución única, la solución del problema (12) se puede escribir como la siguiente combinación lineal de funciones de concentración

$$\varphi(\mathbf{r},t) = C_0(\mathbf{r},t) + \sum_{i=1}^{N} \lambda_i C_i(\mathbf{r},t), \quad \mathbf{r} \in \mathbf{D}, \ t \in (0,T) \tag{13}$$

para cualquier conjunto de coeficientes de amortiguamiento no negativos $\lambda_i \leq 1$, $i = 1, \ldots, N$, y donde $C_i = C_i(\mathbf{r},t)$, $i = 0, \ldots N$, son las soluciones de los siguientes problemas de dispersión:

$$\frac{\partial C_0}{\partial t} + AC_0 = 0, \quad C_0(\mathbf{r},0) = \phi^0(\mathbf{r}) \text{ en } \mathbf{D} \tag{14}$$

y

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + AC_i = f_i(\mathbf{r},t), \quad C_i(\mathbf{r},0) = 0 \text{ en } \mathbf{D}, \quad i = 1,\ldots,N \tag{15}$$

Debido a la ecuación (13), la condición (10) es equivalente a la siguiente relación:

$$\sum_{i=1}^{N} \lambda_i C_i(\mathbf{r},t) \leq \alpha(\mathbf{r},t), \quad \mathbf{r} \in \Omega, \quad t \in (0,T) \tag{16}$$

En donde $\alpha(\mathbf{r},t) = J_0 - C_0(\mathbf{r},t)$ es una función continua que indica diferentes casos para el problema de control. Al definir el parámetro α_0 como

$$\alpha_0 = \min\left\{\alpha(\mathbf{r},t);\quad (\mathbf{r},t)\in\overline{\Omega\times(0,T)}\right\} \tag{17}$$

se establece que el problema de control tiene solución no trivial si $\alpha_0 > 0$, de otra forma, la concentración inicial del contaminante es tan grande que la única opción para controlar la contaminación es definir $\lambda_i = 0$, $i = 1,\ldots,N$ (suspender todas las emisiones). Además, las cotas superiores λ_i^u para los coeficientes de amortiguamiento λ_i, en cualquier estrategia de control que cumpla con la condición ambiental (10), están dados como sigue: [2]

$$\lambda_i^u = \min\{1, m_i\},\quad i = 1,\ldots,N, \tag{18}$$

Donde

$$\begin{cases} m_i = \min\left\{\dfrac{\alpha(\mathbf{r},t)}{C_i(\mathbf{r},t)};\ C_i(\mathbf{r},t)\neq 0,\quad (\mathbf{r},t)\in\overline{\Omega\times(0,T)}\right\} > 0, \\ m_i = \dfrac{J_0}{M_i},\ \text{si}\quad C_0(\mathbf{r},t) = 0\ ,\ \forall\ \ \mathbf{r}\in\Omega\ \ \text{y}\ \ t\in(0,T),\ M_i = \max\left\{C_i(\mathbf{r},t);\ (\mathbf{r},t)\in\overline{\Omega\times(0,T)}\right\} \end{cases}$$

Considerando el planteamiento anterior, los parámetros de reducción óptimos para el control de las fuentes de emisión se obtienen como la solución del siguiente problema de programación cuadrática:

$$\text{Minimizar}\quad F(\lambda_1,\ldots,\lambda_N) = \sum_{i=1}^{N} c_i^2(1-\lambda_i)^2 \tag{19}$$

$$\text{sujeto a:}\quad \left\{\begin{array}{c} \sum_{i=1}^{N}\lambda_i C_i(\mathbf{r}_j,t_k) \le \alpha(\mathbf{r}_j,t_k),\quad \mathbf{r}_j\in\Omega \quad \text{y}\quad t_k\in(0,T) \\ 0\le\lambda_i\le 1,\ i = 1,\ldots,N \end{array}\right\} \tag{20}$$

donde $x_{jk} = (\mathbf{r}_j, t_k)$ son los nodos de la malla en el dominio $\Omega \times (0,T)$, y cada coeficiente $c_i > 0$ representa el costo que la fuente i-ésima paga por reducir sus emisiones.

El conjunto de restricciones (20) (espacio factible) forma un conjunto compacto no vacío en $\mathbf{R}^N$, mientras que la función objetivo $F(\lambda_1,\ldots,\lambda_N)$ es continua, por lo que de acuerdo al Teorema de Weierstrass[6], la solución del problema de programación

cuadrática (19)-(20) siempre existe. Además, al ser el espacio factible un conjunto convexo (ya que es la intersección de conjuntos convexos) y F una función estrictamente convexa (porque su *Hessiano* es una matriz definida positiva [6]), la solución del problema de optimización (19)-(20) es un mínimo global, por lo que ésta es única [6].

En la práctica, la malla introducida en el dominio $\Omega \times (0,T)$ es parte de la malla utilizada para calcular la solución numérica del modelo de dispersión en $\mathbf{D} \times (0,T)$. Asumimos que para algunos nodos en $\Omega \times (0,T)$ la concentración del contaminante es más alta que la norma de calidad del aire; de lo contrario no hay un problema de control de la contaminación del aire.

Por otra parte, para obtener las restricciones en la ecuación (20) es necesario calcular las funciones $C_i = C_i(\mathbf{r},t)$, $i = 0,\ldots,N$, al resolver los problemas de dispersión (14) (para la condición inicial) y (15) (para cada fuente de emisión), por lo tanto, el tiempo de cómputo aumenta con el número de fuentes, además, el problema de control a corto plazo requiere una respuesta rápida, por ello, proponemos utilizar un procedimiento de cómputo paralelo adecuado que permita obtener las funciones de concentración de forma rápida y eficiente: la programación SPMD (*single program multiple data*). En un programa SPMD, todas las unidades de procesamiento ejecutan el mismo programa (programa único) en paralelo, pero cada una tiene su propio conjunto de datos (datos múltiples); diferentes unidades de procesamiento pueden seguir diferentes caminos a través del programa, esto se logra usando un parámetro que etiqueta de forma exclusiva cada unidad (por ejemplo, un identificador de proceso). Los programas SPMD están estrechamente alineados con los entornos de programación basados en el paso de mensajes (por ejemplo, *MPI*), sin embargo, es posible usar el patrón SPMD con *OpenMP* [4]. Así, si se tiene un sistema de cómputo con H hilos (cada uno asociado a un procesador), la formulación presentada anteriormente y el patrón SPMD, sugieren resolver H problemas de dispersión ($H = N + 1$ si $\phi(\mathbf{r},0) = \phi^0(\mathbf{r})$ en $\mathbf{D}$ y $H = N$ si $\phi(\mathbf{r},0) = 0$ en $\mathbf{D}$) de forma casi simultánea, al usar cada procesador para resolver un modelo de dispersión.

Es importante notar que el espacio factible (20) se simplifica al omitir las restricciones que corresponden a los nodos donde la concentración del contaminante satisface la norma de calidad del aire: $\phi(\mathbf{r}_j,t_k) \leq J_0$. Esta simplificación reduce el esfuerzo computacional requerido para resolver el problema de control. Por otro lado, la solución del problema de programación cuadrática (19)-(20) se puede calcular en forma serial, mediante la función de optimización *qpsolve* que pertenece al entorno *Scilab*. Dicha función está implementada en *Fortran 77* y se basa en un algoritmo estable primal-dual

desarrollado por Goldfarb e Idnani[7]. La rutina es capaz de resolver problemas de programación cuadrática estrictamente convexos para miles de variables y restricciones en sólo unos minutos.

5. Ejemplo numérico de control y discusión

El siguiente ejemplo numérico, plantea una situación sintética y utiliza la versión bidimensional del modelo descrito en la sección 3. Se considera que en la región **D** = (0,3) × (0,3) de 9 km^2, hay setenta y un fuentes puntuales de emisión de SO_2, las cuales emiten el contaminante con una de las siete tasas no estacionarias siguientes (l = 1, …,7; Figura 1a):

$$q_1(t) = 100/(1+t), \quad q_2(t) = 60t, \quad q_3(t) = 500e^{-(2-t)^2} + 250e^{-(5-t)^2},$$

$$q_4(t) = 150e^{-(1-t)^2} + 450e^{-(4-t)^2}, \quad q_5(t) = 200e^{-(3-t)^2} + 300e^{-(6-t)^2},$$

$$q_6(t) = \begin{cases} 1000t, & t \in [0,0.5) \\ 500, & t \in [0.5,2.0) \\ -250t + 1000, & t \in [2.0,3.0] \\ 250, & t \in (3.0,4.5) \\ 140t - 380, & t \in [4.5,6.0] \\ 460 & t \in (6.0,7.5) \\ -920t + 7360 & t \in [7.5,8.0] \end{cases} \quad \text{y} \quad q_7(t) = \begin{cases} 250t, & t \in [0,1.0) \\ 250, & t \in [1.0,3.0] \\ 150t - 200, & t \in [3.0,4.0] \\ 400, & t \in (4.0,7.0) \\ -400t + 3200, & t \in [7.0,8.0] \end{cases}.$$

Para esta región se considera que la condición inicial es $\phi^0(x,y)$ = 75exp(-(x-1.55)^2 - (y-0.25) ^{2}) + 50exp(-(x-0.55)^2 - (y-2.05)^2), mientras que los coeficientes en la ecuación de transporte son: σ = 0.36 h^{-1}, μ = 1.8 km^{2}h^{-1}, u = 5 kmh^{-1} y v = (10/3)x kmh^{-1}. Note que el viento con dirección de suroeste a noreste transporta el contaminante desde las fuentes a toda la región **D**. El problema de control se considera en la zona Ω durante el intervalo de tiempo (0,T), T= 8 h.

Para observar la evolución de la concentración con el tiempo en la zona Ω, consideramos cinco puntos de monitoreo distribuidos en esta área: $\mathbf{R}_1$ = (1.05,1.05), $\mathbf{R}_2$

= (1.95,1.05), $\mathbf{R}_3$ = (1.55,1.55), $\mathbf{R}_4$ = (1.05,1.95) y $\mathbf{R}_5$ = (1.95,1.95). La Figura 2a muestra las concentraciones respectivas $\phi(\mathbf{R}_i,t)$, $i= 1,\ldots,5$ y, el límite permitido (norma de calidad del aire) para la concentración del contaminante $J_0 = 210\ \mu g / m^3$ para las ocho horas de exposición.

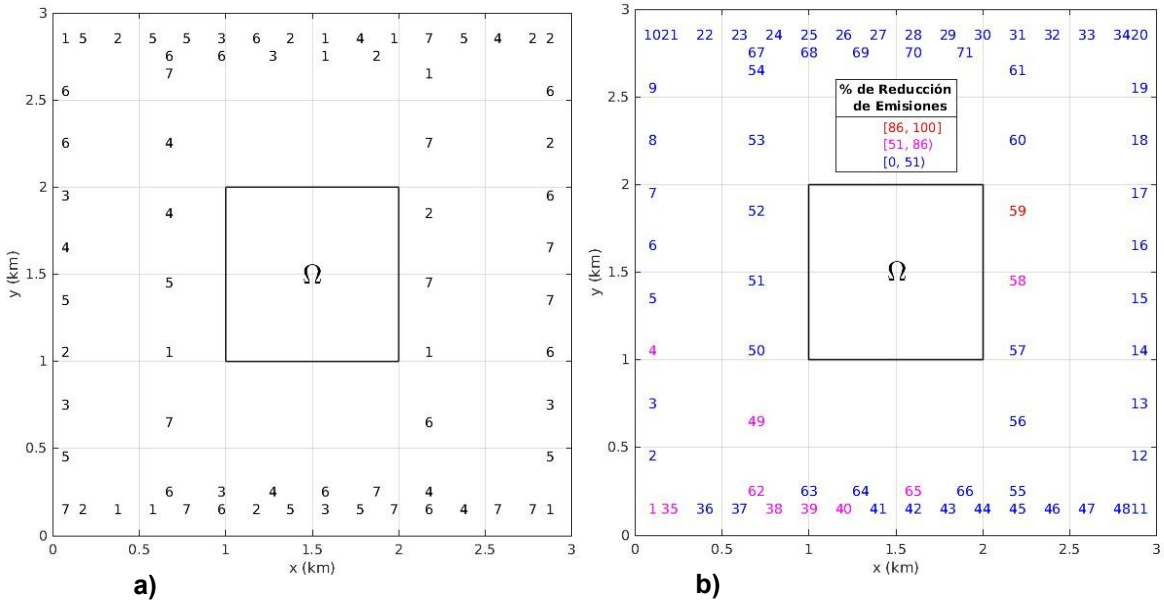


Figura 1. ***a)*** *Distribución de las fuentes de emisión en* **D** *y tipos de éstas;*

b) *porcentaje de reducción de emisiones para cada fuente.*

Se observa que la concentración del contaminante en los cinco sitios de monitoreo está por encima de este límite, aproximadamente de $t = 1$ a $t = 8$, lo que representa una violación de la norma sanitaria correspondiente en casi todo el intervalo de tiempo. En este caso, el parámetro $\alpha_0 = 160.1294 > 0$ por lo que el problema de control tiene solución no trivial.

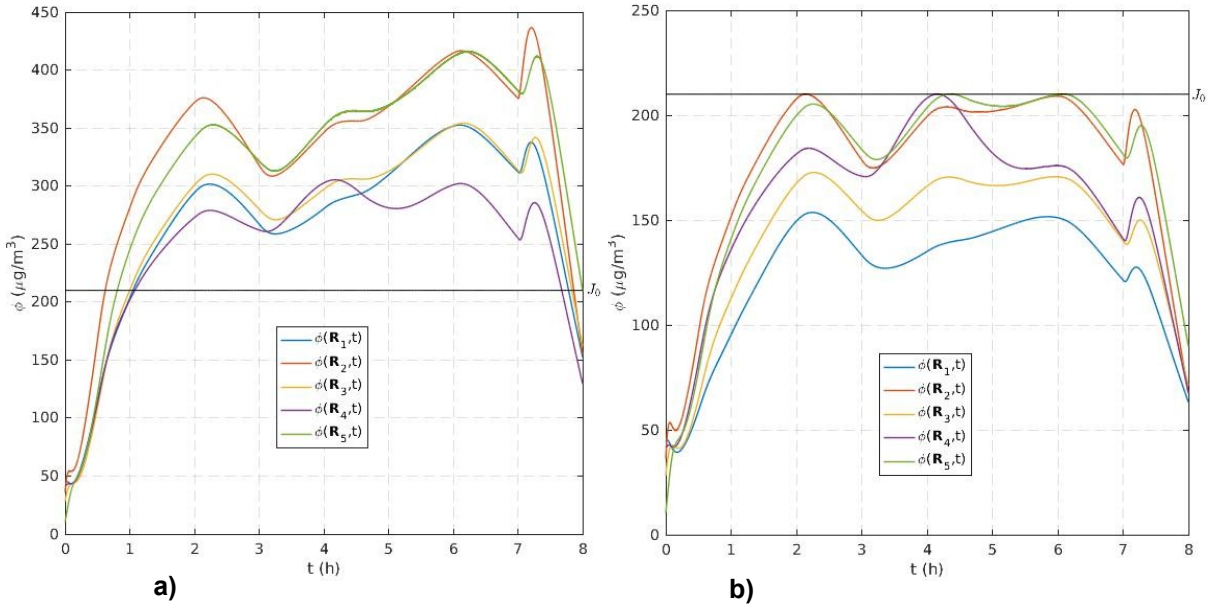


Figura 2. Evolución en el tiempo de la concentración del contaminante en cinco sitios de monitoreo en Ω:

***a)** antes de aplicar el control de emisiones; **b)** después de aplicar la estrategia óptima de control de emisiones.*

Por otro lado, las cotas superiores para los parámetros de amortiguamiento son $\lambda_i^u = 1$, i = 1,…,71, este resultado es una consecuencia de la baja concentración de dióxido de azufre producida por cada fuente en la zona Ω (ver ecuación 18). De todos los valores máximos M_i, M_{62} = 57.0447 es el más grande, por lo tanto, cada fuente no produce la violación de la norma sanitaria y la concentración excesiva de contaminantes es el resultado de las emisiones de todas las fuentes.

El valor de cada coeficiente de costo es c_i = 10, i = 1,…,71. Con respecto a los parámetros de amortiguamiento óptimos, el más grande corresponde a λ^*_{33} = 0.9994 mientras que el más bajo es λ^*_{59} = 0.1393, es decir, de todas las fuentes, la número 59 es la que debería reducir más sus emisiones (86 %), mientras que la fuente número 33 es la que menos debería reducir su actividad (0.06 %). Con base en cada coeficiente de amortiguamiento, introducimos ahora tres intervalos en los que podemos incluir el total

de las fuentes, dependiendo de su porcentaje respectivo de reducción. Resumimos esto en la Tabla 1, por lo tanto, podemos ver que debido a la concentración excesivamente alta en la zona Ω, una fuente debe reducir drásticamente sus actividades, mientras que diez de ellas deben operar de una manera baja a muy baja, las sesenta restantes deben hacerlo de manera moderada a alta. La Figura 1b muestra la ubicación de cada fuente en **D** y el intervalo de reducción al que pertenece cada una.

Tabla 1. Porcentaje y número de fuentes encontradas en cada uno de los intervalos, según el porcentaje de reducción de emisiones correspondiente.

% de reducción	**% de fuentes (número de)**
[86,100]	1.41 (1 fuente)
[51, 86)	14.08 (10 fuentes)
[0, 51)	84.51 (60 fuentes)

La Figura 2b muestra las concentraciones obtenidas con las nuevas tasas de emisión. En todos los sitios de monitoreo $\mathbf{R}_i$, $i= 1,\ldots,5$, la concentración del contaminante satisface la norma de calidad del aire en todo el intervalo de tiempo, de hecho, el valor máximo de la función de concentración ϕ^* en el dominio $\Omega \times (0,T)$ es J_0. Es decir, la condición ambiental (10) se satisface.

Para obtener las funciones de concentración C_i se resolvieron en paralelo $H = 71 + 1 = 72$ modelos de dispersión bajo el patrón SPMD, usando 3 nodos de cálculo (cada uno con 24 procesadores) del clúster Ometeotl [8,9]. El tiempo de cómputo correspondiente, seleccionado como el valor de tiempo máximo entre todos los obtenidos por todos los hilos utilizados, cuando cada uno resuelve un modelo de dispersión, es T_c = 85.20 [s]. Cabe mencionar que cada modelo de dispersión se resuelve numéricamente aplicando un esquema de separación de operadores por componentes [5], los programas correspondientes están implementados en *Fortran 90* y *OpenMP*.

Por otra parte, el procesamiento de los archivos de salida para todos los modelos de dispersión, así como la resolución del problema de programación cuadrática correspondiente, se realizaron usando cómputo serial, en una computadora portátil con procesador *Dual core* AMD A9-9400 de 2.4 GHz, mediante el entorno *Scilab*; la malla del dominio usada en el problema de programación cuadrática (19)-(20) contiene 10 × 10 × 8000 = 800000 nodos y su solución se calculó mediante la rutina *qpsolve* con el mismo número de restricciones y setenta y un variables. El tiempo de procesamiento correspondiente es T_p = 123.65 [s]. De esta forma, el tiempo de cálculo estimado, requerido para implementar la estrategia óptima de control a corto plazo usando el patrón SPMD para este ejemplo es $T_{EOC} = T_c + T_p$ = 208.86 [s] (4.9 minutos).

6. Conclusiones

En este trabajo se desarrolló y analizó una estrategia de control de la contaminación del aire a corto plazo, basada en el cómputo en paralelo y la solución de un modelo de programación cuadrática. Los resultados numéricos muestran que la aplicación de dicho modelo de optimización reduce hasta niveles aceptables la concentración del contaminante en todo punto de la zona de control y en cada instante del intervalo de tiempo de control. Además, dicho método de control tiene dos cualidades importantes: se puede aplicar a cualquier modelo de dispersión lineal y, permite obtener parámetros de amortiguamiento para cualquier tipo de fuentes de contaminación, ya sean puntuales, lineales o superficiales. Esta estrategia es la mejor opción de control para este tipo de problema y modelo de optimización, cuando el poder de cómputo no es una limitación, ya que permite distribuir el trabajo de cómputo que implica más tiempo (la solución de los modelos de dispersión) por medio del cómputo paralelo y el patrón SPMD y, por lo tanto, plantear y resolver el problema de la programación cuadrática con el mayor detalle posible (considerando una cantidad considerable de restricciones y variables).

7. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado por las becas: CONACyT, CVU No. 445746, y SNI-CONACyT No. 25170. Los autores agradecen al Dr. Jorge Zavala Hidalgo, jefe del grupo de investigación “Interacción Océano-Atmósfera” del Centro de Ciencias de la Atmósfera

de la Universidad Nacional Autónoma de México, por la asignación de una cuenta en el clúster Ometeotl.

8. Bibliografía

1. Cooper W. W., Hemphill H., Huang Z., Li S., Lelas V., Sullivan D. W. Survey of Mathematical Programming Models in Air Pollution Management. European Journal of Operational Research, 96(1), 1-35 (1996).

2. Parra-Guevara, D., Yu. N. Skiba and D. Peña-Maciel. Controlling the Forcing of the Linear Transport Equation to Meet Air Quality Norms at Every Point. International Journal of Applied Mathematics, 30(6), 527-545 (2017).

3. Flagan R. C., Seinfeld J. H. Fundamentals of Air Pollution Engineering, Prentice-Hall (1988).

4. Mattson, T. G., Sanders, B. A., Massingill, B. L. Patterns for Parallel Programming. Software Patterns Series. Addison-Wesley (2005).

5. Parra-Guevara D., Skiba Y. N. Quadratic Programming Formulation for Controlling the Emissions of Air Pollution Point Sources. In: Horizons in Computer Science Research (T. S. Clary Editor), Vol. 14. Nova Science Publishers, Inc., NY, USA. 207-248 (2017).

6. Luenberger D. G. Linear and Nonlinear Programming. Addison-Wesley, Mass. (1984).

7. Goldfarb D., Idnani A. A numerically stable dual method for solving strictly convex quadratic programs. Mathematical Programming, 27, 1-33 (1982).

8. Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México. Desarrollo de un sistema de pronóstico operacional de eventos extremos basado en modelos numéricos de predicción de las condiciones meteorológicas, de oleaje y marea de tormenta, incluyendo la evaluación del desempeño de los modelos y la determinación de incertidumbres, con fines de alertamiento (2017). Recuperado 16/Abril/2020: http://www1.cenapred.unam.mx/SUBCUENTA/19a%20SESI%C3%93N%20ORDINARIA/IX.%20Desarrollo%20de%20un%20sistema%20de%20pron%C3%B3stico.pdf

9. Oropeza-Alfaro Pavel, Cruz-Santiago Pedro, Herrera-Moro Dulce, Zavala-Hidalgo Jorge y García Agustín. Implementación del clúster Ometeotl en el CCA-UNAM. Boletín informativo de la Unión Geofísica Mexicana, A. C., Geos, Vol. 38, No. 1, Noviembre, 2018 (pp. 230). Recuperado 16/Abril/2020: https://www.raugm.org.mx/2018/docs/geos/geos38-1.pdf

Estimación de Características de Materiales Utilizando Energía Electromagnética

Calva G[1], Herrera A[1], Prieto R[1], Padrón A[1,] Pacchiano M[2]

[1]Grupo de Modelado y Simulación de Procesos. Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología. UNAM. Circuito Exterior. Ciudad Universitaria. Apdo. postal 70-186, Coyoacán. 04510. Ciudad de México. México. Tel. (01-55) 56228602. Ext. 1303
[2]Universidad Anáhuac del Sur. Av de las Torres 131, Torres de Potrero, 01780. Ciudad de México. México.
e-mail: gerardo.calva@icat.unam.mx; alberto.herrera@icat.unam.mx; rafael.prieto@icat.unam.mx; alejandro.padron@icat.unam.mx; mpg01@yahoo.com

1. Resumen

En este trabajo se presentan los resultados de aplicar dos tipos de pruebas sobre materiales granulados puestos entre dos portaobjetos el espacio para el material es de 1mm de espesor; se utiliza energía electromagnética a 3.1 cm de longitud de onda con una potencia que no excede los 47mW. Cada prueba genera datos suficientes para obtener la Transmitancia; absorbencia; SWR y coeficiente de reflexión del material bajo prueba. Se establece que es posible analizar materiales utilizando energía electromagnética a esta longitud de onda y potencia; abre la posibilidad para una caracterización de materiales utilizando técnicas no destructivas como la aquí utilizada. Se hace énfasis en que se utiliza una longitud de onda en específico para las pruebas, por lo que, cualquier prueba que se haga sobre material similar al aquí utilizado, a una longitud de onda diferente, no necesariamente se obtendrán los mismos valores.

2. Introducción

Reflexión/refracción/absorción/dispersión, son algunos de los términos con los que se puede llegar a caracterizar a un material. Cada material responde de cierta forma cuando es analizado, y esto dependerá del tipo de análisis que se le aplique. Cuando la intención es realizar un análisis utilizando tecnologías no destructivas por lo general se lanza energía sobre el material del que se desea saber sobre sus características. Lo que se busca es no alterar las características físicas de la muestra, por ello es por lo que se utiliza una cierta cantidad de energía electromagnética, para ser arrojada (aplicada) sobre la muestra, para luego recolectar parte de esa energía, la que ya interactuó con la muestra de material. En estos experimentos que se realizaron,

se utilizó una señal con una longitud de onda de 3.1 cm con una potencia aproximada de 47mW.

Cuando se aplica energía electromagnética sobre materiales se debe tener en consideración que esto puede dar cabida a fenómenos de transmisión; reflexión; refracción; absorción; dispersión, cada uno de ellos se puede llegar a presentar en lo individual o en conjunto, dando paso a una pérdida de energía electromagnética que se debe restar del total de energía aplicada inicialmente sobre el material. Lo importante en estas pruebas es generar los suficientes datos tanto de las condiciones de la muestra como de los resultados que se obtienen de aplicar energía sobre la muestra, lo anterior posibilita una correlación entre las condiciones de la muestra y los resultados obtenidos, de esta manera al volver a aplicar energía sobre una muestra desconocida y comprobar los datos que genera para compararlos con los que ya se tienen. Se podrá suponer o estimar en qué condiciones se encuentra la muestra de la que se desconocen sus características.

Mediante una correlación se puede estimar, alguna de sus características.

Cada uno de los términos mencionados se sucede o está incluida dentro de la respuesta que resulta de la aplicación o envío de energía electromagnética sobre un medio; como también ya se mencionó, esto se sucede de manera individual y/o en combinación entre ellos.

Al aplicar energía electromagnética sobre un dieléctrico que actúa como frontera con un material del cual se quiere conocer alguna propiedad, y se aplica la energía electromagnética con un cierto ángulo de inclinación, se presentará la refracción.

Cuando en experimentos de laboratorio está involucrada la luz, se tienen ciertas suposiciones, como que al aplicar luz sobre una superficie, se puede considerar como una línea o rayo que se aplica; esto resulta muy conveniente cuando se está usando una onda electromagnética (esto cuando la longitud de onda es pequeña en comparación con las dimensiones de la superficie que actúa como frontera entre dos medios); utilizar geometría óptica simplifica de manera muy eficiente la aplicación de energía sobre un material. Al considerar la teoría de un rayo, el cual se representa con una línea recta facilita de manera importante el desarrollo teórico, y la explicación de los experimentos de aplicación de energía electromagnética, ya que no se obliga a representar la energía aplicada, en términos de campo eléctrico € y campo magnético (**H**).

Cuando una onda electromagnética cae sobre una superficie definida como dieléctrica, y si se define también un punto de incidencia (aprovechando las teorías de

un rayo) y esta energía incide en el material de manera oblicua, se podrán obtener dos ondas. Una de ellas definida como onda refractada y otra como onda reflectada. Para ilustrar este fenómeno se representa con un dibujo en la siguiente figura.

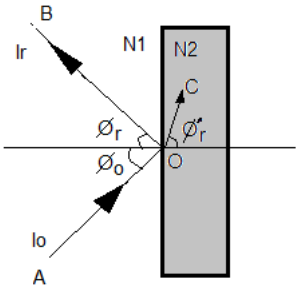


Figura 1. Dibujo que ilustra de manera sencilla la aplicación de energía electromagnética, teniendo como principio la teoría óptica de aplicación de un rayo.

Pero cuando la energía electromagnética se aplica de manera directa, sin un cierto ángulo de inclinación se podrá considerar (mediante la teoría de rayo) que la energía se está aplicando sobre un eje imaginario que atraviesa la muestra y que está perpendicular a ella.

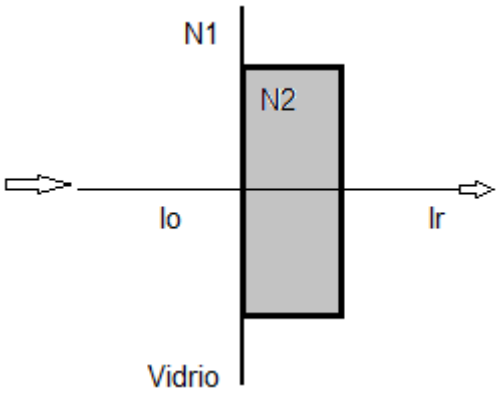


Figura 2. Dibujo que ilustra el concepto de aplicación de energía electromagnética, en línea recta.

La energía incidente siempre será mayor que la energía reflejada la relación de energía incidente y energía reflejada se expresa por el coeficiente de reflexión el cual estará comprendido entre cero y uno.

2.1 Transmitancia.

Ley de Lambert Beer o ley de Bourguer

Transmitancia. La transmitancia se expresa en función de la energía que se le aplica y de la energía que es detectada, después de pasar, a través del material.

$$T = \frac{I}{I_o} \tag{1}$$

I_o Energía aplicada

I Energía detectada (salida)

2.2 Absorción. Absorbencia (Coeficiente de Extinción).

Se expresa como: menos el logaritmo decimal de la transmitancia

$$A = -\log_{10}(T) \tag{2}$$

Esta relación empírica que relaciona la absorción con las propiedades del material por el cual se intenta atravesar el haz de energía electromagnética.

2.3 SWR

El SWR es la relación de onda estacionaria, por sus siglas en inglés. La onda estacionaria se forma cuando la energía que se emite no avanza completamente en la dirección en la que es dirigida, parte de esa energía emitida es regresada sobre el eje de propagación. [1] en algunos textos no se especifica de manera directa el significado de las siglas asignadas para la medición de la onda estacionaria, por ello aquí se define como:

$$VSWR = SWR = ISWR \tag{3}$$

Así se evitarán confusiones [2] .

Se define la relación de onda estacionaria como:

$$SWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} \tag{4}$$

$V_{max} = Valor\ máximo$

$V_{min} = Valor\ mínimo$

2.4 Coeficiente de reflexión

El coeficiente de reflexión es un número que representa un porcentaje de la energía que se aplicó pero que no llegó o no pasó, y que se regresa hacia la fuente que la emitió. La energía se supone que se regresa a través de la misma línea por donde inicialmente avanzó hacia su destino, la carga de la línea, pero que por alguna razón no se pudo entregar esa energía a dicha carga. Esto por supuesto que representa un problema que se vuelve bastante grave, cuando se utilizan potencias elevadas de energía, porque puede llegar a destruir el emisor y es por ello por lo que se procura que en la línea sea mínima la energía que se está reflejando hacia la fuente emisora. Las causas por las que la energía se está regresando en vez de avanzar pueden ser variadas, sin embargo, se puede resumir en que las impedancias no están acopladas.

Por supuesto que por diseño lo principal es que la energía avance se entregue a la carga, sin embargo, existen situaciones o experimentos como los realizados en este trabajo que intencionalmente se busca medir la onda estacionaria que se está generando debido a que se ha dispuesto un material entre el emisor y el sensor.

El coeficiente de reflexión para una línea de transmisión se puede obtener de diferentes maneras, dependiendo de qué información se obtenga, de que datos se dispone.

$$\Gamma = \frac{E_{reflejada}}{E_{aplicada}} = \frac{E_{max} - E_{min}}{E_{max} + E_{min}} = \frac{SWR - 1}{SWR + 1} = \frac{Z_L - Z_O}{Z_L + Z_O} \tag{5}$$

3. Condiciones experimentales

En todas y cada una de las pruebas que se hicieron, se optó por realizar únicamente mediciones en amplitud de la señal detectada; estas se especifican en unidades de Volts. En la figura siguiente, figura 3, se presenta un dibujo con la configuración general del equipo utilizado en las pruebas.

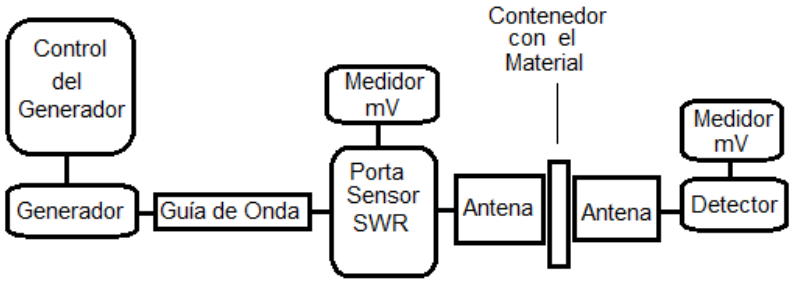


Figura 3. Dibujo que representa la configuración general utilizada en las pruebas en materiales.

Se puede utilizar el arreglo ejemplificado en la figura 3, o reagrupar la configuración para que sólo sirva a una de las pruebas, todo dependerá del orden en que se realicen las pruebas y de las condiciones a las que se sujetaran dichas pruebas.

Las pruebas se realizan en el material depositado en un contenedor formado por placas de vidrio, las placas de vidrio tienen un espesor de 1 mm ± 0.1 mm. El contenedor con el material a prueba se sitúa frente al emisor de energía; el detector de energía está dispuesto a una distancia de no más de 10.5 cm en el lado opuesto al arreglo emisor contenedor. Similar al arreglo que se presenta en el dibujo de la figura 2.

El emisor de energía electromagnética es un oscilador acoplado, con una longitud de onda de 3.1 cm, el cual proporciona una potencia máxima de 50 mW. Esta potencia que proporciona el generador se puede mantener, y posteriormente disminuirla sin alterar en si al mismo generador; mediante el uso de un atenuador que se integra en la línea de viaje de la energía se logra disminuirla, previo a ser aplicada a la muestra. Algunos materiales pueden ser sensibles a la energía electromagnética, aun aplicándose en estos pequeños márgenes de valores. El resultado de la aplicación excesiva de energía puede resultar en variaciones de las características del material; lo que alejaría a este tipo de aplicación, de los métodos no destructivos de análisis.

Cabe señalar, que existe una tendencia a utilizar señales con una potencia máxima de 10 mW, potencia aplicada sobre la muestra; es factible que se proponga esta potencia debido a que se puede optar por los nuevos generadores de señales, que entregan esta potencia como máximo.

En configuraciones tradicionales, se dispone de elementos de prueba como lo es el atenuador, que permite disminuir la potencia aplicada a la muestra, sin alterar la frecuencia de la señal y la potencia que genera el arreglo.

Por definición la energía que se refleja es energía que por obvias razones no ha sido refractada absorbida dispersada ni ha podido transmitirse a través del material, como bien se representó en el dibujo de la figura 1.

Los experimentos se llevaron a cabo en el mismo sitio del laboratorio con el mismo equipo y a una temperatura ambiente de: 23.6 ºC ±1.5 ºC.

3.1 Experimentos.

En los experimentos se sitúa una porción de material entre dos placas de vidrio de dimensiones: 25.4 x 76.2 mm y con un espesor de 1mm ±0.1mm cada placa.

El material se aloja entre las piezas de vidrio rectangular (portaobjetos) permitiendo una capa de 1mm de espesor. Este espesor se conservó para todas las pruebas; para lograr un acomodo del material; se fue llenando manualmente el compartimiento cuando la celda ya estaba armada. Por lo que, cualquier objeto mayor a esas dimensiones, propio del material o lo que sea considerado como basura (u objeto extraño al material) fue desechado.

3.2 Metodología.

En estos experimentos se sigue el método de aplicar la energía electromagnética en línea recta, directa sobre la celda que contiene la muestra de material sin ángulo de incidencia, tratando de minimizar las pérdidas de la energía aplicada. Se procura que el material ofrezca un frente a la señal; se deposita en el contenedor de tal modo que esté uniformemente distribuido en toda la celda.

Se plantean dos experimentos: (a) midiendo valores de voltaje recibido a través de la muestra y, (b) midiendo el VSWR que se genera por el material.

3.3 Protocolo para los experimentos.

1)Se define el tipo de experimento a realizar. Experimento a; Experimento b.

2)Se prepara la celda con la muestra que será utilizada. Como ya se especificó.

3)Se dispone la instrumentación según el experimento.

a. Generador; guía; soporte de sensor (ajuste de celda con material); sensor; medidor.

b. Generador; guía; carro guía detector; medidor; soporte de sensor (ajuste de

celda con material).

4)Se activa el generador y se procura un tiempo de estabilización del equipo.

5)Se procede a realizar las mediciones según el experimento.

a. Se procede a determinar el valor máximo recibido sin celda de muestra.

b. Se sitúa la celda con la muestra frente al emisor. Se desplaza el carro con el detector para determinar un valor máximo; inmediatamente después se desliza hasta encontrar un valor mínimo.

6)Se registran los valores obtenidos.

3.4 Especificaciones de los experimentos.

a) Experimento. Detección de la energía que logra atravesar el material.

Se sitúa la celda que contiene el material (1 mm de espesor de material) en la salida del emisor; y el detector está fijo en aproximadamente a: 10.5 cm de distancia, en línea recta. Una vez activo el generador, se procede a registrar los valores.

En primer término, se sigue el protocolo: primero detectar el máximo valor que se recibe cuando no está la celda de prueba. En segundo paso, se sitúa la muestra en la salida del generador y se procede a registrar el valor que se obtiene.

b) Experimento. Se determina el SWR generado durante la prueba.

Una vez situada la celda que contiene el material bajo prueba, se sigue el protocolo del experimento para lograr registrar en este caso en específico, las lecturas Máxima y mínima que se detectan con el medidor de SWR. En este experimento se avanza el carro con el sensor y se localiza el valor mínimo: V_{min} (máximo) y se continúa avanzando hasta encontrar un valor máximo: V_{max} (mínimo). Estos valores son los que se generan cuando se tiene una onda estacionaria, y con base en estos valores es que se pueden conocer algunas características del material bajo prueba.

4. Resultados y discusión

Con los valores obtenidos en los experimentos se definen algunas características del material muestra puesto en la celda de prueba.

i) Transmitancia

Si consideramos que son los niveles de amplitud de la señal aplicada (V_0) y de la señal resultante (V), señal que se detecta después de interactuar con la muestra de material.

$$T = \frac{V}{V_0} \tag{6}$$

Valores en Volts, detectados durante el experimento:

$$V = 0.347 \tag{7}$$

$$V_0 = 0.4767 \tag{8}$$

Se obtendrá que:

$$T = 0.7279 \tag{9}$$

ii) Absorbencia o Coeficiente de Extinción.

Según la expresión para la absorbencia esta se obtiene:

$$A = -\log_{10}(0.7279) \tag{10}$$

Lo que resulta en:

$$A = 0.1379 \tag{11}$$

Estos datos nos arrojan ciertas características sobre esta prueba o resultado de experimento.

Por principio. La transmitancia de este material, que pudiera estar situada entre 0 y 1. (cero para una opacidad total a la energía electromagnética aplicada, y uno para una transparencia completa) Está indicando que la mayoría de la energía aplicada está siendo bloqueada. En términos de porcentaje se puede considerar que más del setenta por ciento de dicha energía ha sido bloqueada, para esta longitud de onda.

En segunda observación de los resultados. La Absorbencia indica que es muy poca la energía electromagnética que se está absorbiendo lo cual puede resultar congruente ya que, si no pasa energía a través de la materia, esta no podrá o no estará en posibilidad de absorber; el material absorberá únicamente la poca energía que estará en su superficie.

La energía que llega al sensor del detector pudiera ser la que, por rebote en el mismo soporte de la celda de material, está alcanzando el extremo donde está situado dicho detector, además de la energía que por los extremos de la celda de material pudiera estar logrando cruzar.

iii) Coeficiente de Reflexión / Mediciones de VSWR

$$V_{max} = 23.9 \tag{12}$$

$$V_{min} = 2.2 \tag{13}$$

$$VSWR = \frac{V_{max}}{V_{min}} = 10.86 \tag{14}$$

Se obtiene el valor del VSWR, a partir de los datos generados del experimento; con el valor del VSWR se calcula el coeficiente de reflexión. Según la expresión matemática siguiente:

$$\Gamma = \frac{VSWR - 1}{VSWR + 1} \tag{15}$$

Sustituyendo por los valores correspondientes, se obtiene que el coeficiente de reflexión será:

$$\Gamma = 0.83 \tag{16}$$

El valor del SWR de momento puede impresionar bastante si se está acostumbrado a manejar valores de SWR cercanos en magnitud a dos, sin embargo, en algunos textos podemos encontrar pruebas sobre elementos de conmutación que reportan valores de SWR de 50 [3]. Lo que pudiera parecer impensable.

Siguiendo los protocolos establecidos aquí se procedió a probar diferentes materiales destacándose dos muestras de material. Los resultados se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Se muestran los resultados obtenidos en las pruebas.

Muestra de Material	Transmitancia (T)	Absorbencia (A)	VSWR	Coeficiente de Reflexión. (Γ)
A	0.7279	0.1379	10.86	0.83
B	0.796562	0.09878	8.952	0.799

5. **Conclusiones.**

Si se asocian los valores detectados de VSWR y del coeficiente de reflexión, con las características físicas que tiene el material probado en los experimentos, será posible por correlación determinar en pruebas subsecuentes, los valores que posee un material, midiendo solamente el VSWR. Lo mismo sucederá con los valores de Transmitancia y de Absorbencia; por correlación se podrán identificar valores similares para materiales desconocidos con solo los valores máximos y mínimos de detección.

Se debe tener en consideración que las prueba realizadas se hicieron utilizando energía electromagnética con una longitud de onda de 3.1 cm, y que para esta longitud de onda no es posible atravesar con facilidad algunos materiales, no si no se está bajo ciertas consideraciones que no se han planteado en estás pruebas; y bajo una cierta metodología no tratada en el presente trabajo. Cada material tiene una cierta respuesta según la longitud de onda usada en su análisis.

Estos resultados aquí obtenidos durante los experimentos ameritan mayor profundidad de estudio.

6. Bibliografía

1. F.R. Connor. ¨Waves¨ 2nd. Ed. Edward Arnold. 1986
2. Michael Steer. *¨Microwave and RF design¨*. 2nd edition. Scitech publishing. 2013
3. Roberts. L.W. *¨Duplexing tube characteristics¨* Chapter XXII. 1960

Desvulcanización de caucho residual utilizando peróxido de benzoilo como agente desvulcanizante

Álvarez-Maya, D. G.,[1] Sánchez-Rosete Estrada, R.,[1] Vásquez-Salinas, A.[1] Rojas-Rodríguez, A.[1]

[1]Facultad de Ingeniería, Universidad Anáhuac México Campus Norte.

danielg1122@gmail.com, reginarosete12@gmail.com, alina.vasal129@gmail.com, alma.rojas@anahuac.mx

1. Resumen

La desvulcanización de residuos de caucho sintético se llevó acabo utilizando peróxido de benzoilo (BPO) como agente desvulcanizante y xileno como disolvente. Se obtuvo un porcentaje de desvulcanización de 24.2% con las siguientes condiciones de operación: concentración de 5 g/L de agente desvulcanizante, 4 horas de tiempo de reacción, 85 °C y velocidad de agitación de 300 RPM.

2. Introducción

El caucho es un material polimérico conformado a partir de monómeros de isopreno. Después de ser vulcanizado, es decir, de entrecruzar las cadenas mediante azufre el caucho es convierte en un producto elástico más estable y resistente.

Se cuenta con desechos de caucho de un proceso de manufactura de rodillos, que son clasificados como residuos de manejo especial, por lo que se requiere un proceso para reducir el impacto ambiental de los mismos, para ello se propone hacerlo a través de la desvulcanización del mismo. Para la desvulcanización del caucho se han propuestos métodos físicos y químicos, de la primera clasificación se encuentra la desvulcanización mecánica, termo-mecánica, térmica, microondas y ultrasónica. De la segunda clasificación, está la desvulcanización química, químico-mecánica y termoquímica. De las metodologías revisadas se decidió escoger la desvulcanización química, debido a que tiene un mayor porcentaje de reutilización que cualquier proceso físico, por lo que se puede obtener la mayor recuperación posible.

En trabajos realizados por L. Asaro et al (2018), B. Sripornsawat et al (2016) y G. Jana, (2007) se utilizó como agente desvulcanizante, disulfuro de difenilo, pero en cada uno modifican el proceso de molienda y el disolvente utilizado. Obteniendo como resultado que las fuerzas mecánicas del caucho desvulcanizado contras el vulcanizado, en el primero no se vio afectada, en el segundo ésta disminuyó y en el tercero fueron muy parecida. Adicionalmente, en el experimento en el Laboratorio de Química en Beijing [DOI: 10.1002/app.37542], K. Jiang (2012), realizaron la desvulcanización de caucho butilo, con dióxido de carbono supercrítico junto con sulfuro de difenilo como agente desvulcanizante. P. Sutanto et al (2006) realizó la desvulcanización de caucho etileno-propileno-dieno (EPDM) para desarrollar un modelo cinético para dicho proceso. Se utilizó hexadecilamina (HDA) como agente desvulcanizante, aceite parafínico 150 Sunpar® como disolvente orgánico y se aplicó una fuerza mecánica.

Una desventaja de estos procedimientos es que los agentes químicos que se utilizan son de alta toxicidad, como lo son el sulfuro de difenilo y la amina, o se requieren condiciones de alta presión, lo cual también es peligroso. Sin embargo, es importante conocer qué otros métodos

existen para saber los agentes desvulcanizantes utilizados, así como la innovación de la desvulcanización química.

En el presente trabajo se explican los principios del método químico seleccionado, así como del hinchamiento de las estructuras poliméricas entrecruzadas para determinar el porcentaje de vulcanización de un caucho, los agentes desvulcanizantes a usar y el efecto del tiempo de reacción y temperatura. Además, se presenta la metodología y los resultados de la prueba de densidad de entrecruzamiento, de la reproducción de las condiciones experimentales y de la optimización de la variable agente desvulcanizante, tiempo de reacción, temperatura, volumen y agitación.

3. Metodología

Todas las pruebas descritas a continuación fueron realizadas por triplicado con el objetivo de estudiar la desviación de los resultados.

3.1 Densidad de entrecruzamiento

Una muestra caucho previamente pesada se introdujo en tolueno dentro de una estufa a una temperatura de 30 °C; cada hora se retiró la muestra del tolueno y se pesó en balanza analítica rápidamente para evitar la evaporación del disolvente. Se repitió el procedimiento hasta no observar cambios significativos en la masa (hinchamiento al equilibrio) [15]. Con el valor obtenido, se determinó la densidad de entrecruzamiento usando las siguientes fórmulas (prueba de hinchamiento).

$$V_r = \frac{(D - FH)/\rho_r}{(D - FH)/\rho_r + A_0/\rho_s} \quad (1)$$

$$-\left[\ln(1 - V_r) + V_r + \chi \cdot V_r^2\right] = \frac{\rho_r}{M_c} \cdot V_s \cdot \left(V_r^{1/3} - \frac{V_r}{2}\right) \quad (2)$$

$$v_c = \frac{1}{2M_c} \quad (3)$$

Donde:

- H es la masa de la muestra
- D es la masa de la muestra hinchada

- F es masa de la fracción de compuestos insolubles F=H/D
- A_0 es la masa del disolvente absorbido A_0= D-H
- ρ_r es la densidad el caucho
- ρ_s es la densidad del disolvente
- V_r es la fracción de volumen de caucho en el gel hinchado
- ρ_r es la densidad el caucho
- χ es el parámetro de interacción del disolvente con el polímero χ=0.39 [13]
- V_s es el volumen molar del disolvente

Para determinar el porcentaje de desvulcanización de las muestras tratadas, utilizó la siguiente formula.

$$\%\text{Desvulcanización} = \frac{v_{c1} - v_{c2}}{v_{c2}} \times 100 \quad (4)$$

Donde v_{c1} y v_{c2} son las densidades aparentes de entrecruzamiento antes y después de la desvulcanización, respectivamente.

3.2 Desvulcanización

Se tomó como base el procedimiento del artículo *New Route for Devulcanization of Rubber and the Properties of Devulcanized Rubber* [13], se colocó una muestra de caucho previamente pesada en una disolución de peróxido de benzoilo (BPO) en xileno de 50 mL (5 g/L). Esta se introdujo en una estufa a 80 °C durante una hora; posteriormente, se retiró la muestra de la disolución y se reintrodujo a la estufa a 60 °C durante 4 horas para su secado. Finalmente, se determinó su densidad de entrecruzamiento con la prueba de hinchamiento descrita anteriormente.

3.3 Agente desvulcanizante

Se repitió el procedimiento de la sección 3.2 modificando el agente desvulcanizante. Se analizó el efecto sobre el porcentaje de desvulcanización utilizando peróxido de benzoilo (BPO), azobisisobutironitrilo (AIBN) y peróxido de hidrógeno (H_2O_2). Se escogieron dichos agentes desvulcanizantes porque presentan una descomposición radicalaria, la cual favorece a la ruptura de los enlaces S-S del caucho a tratar. El agente seleccionado para las pruebas posteriores será el que obtenga un mayor porcentaje de desvulcanización.

3.4 Tiempo de reacción

Se replicó el procedimiento de la sección 3.2, con el agente desvulcanizante de mayor eficiencia, respetando las condiciones de concentración (5 g/L) y temperatura (80 °C), variando el tiempo de reacción: 30, 60, 90, 120, 180, 240 y 300 min. Se analizaron las muestras con la prueba de hinchamiento para determinar el tiempo óptimo.

3.5 Temperatura

Se replicó el procedimiento de la sección 3.2, con el agente desvulcanizante de mayor eficiencia, respetando la concentración (5 g/L), con el tiempo resultante de la optimización de la variable, variando la temperatura: 80, 85 y 90 °C. Se determinaron estos intervalos por cuestiones de seguridad. Se analizaron las muestras con la prueba de hinchamiento para determinar la temperatura óptima.

3.6 Concentración del agente desvulcanizante

Se replicó el procedimiento de la sección 3.2, con el agente desvulcanizante de mayor eficiencia, con el tiempo y temperatura resultantes de la optimización de las variables, variando la concentración a: 2.5, 5, 10, 20 g/L. Se analizaron las muestras con la prueba de hinchamiento para determinar la concentración óptima.

3.7 Agitación

Se replicó el procedimiento de la sección 3.2, con el agente desvulcanizante de mayor eficiencia a la temperatura, tiempo de reacción y concentración óptimas. Se analizó el efecto de la agitación 100 RPM y 300 RPM, siendo estos valores para provocar el movimiento del caucho y evitar la formación de vórtices, respectivamente.

4. Resultados y discusión

Se muestran los resultados promedio de las pruebas de optimización de las variables tiempo de reacción, temperatura, volumen y agitación. Para determinar cuáles son los valores óptimos, se escogió aquel que obtuvo un mayor grado de desvulcanización.

4.1 Densidad de entrecruzamiento

Como se puede observar en la figura 1, el hinchamiento en equilibrio se alcanza a las 6 horas; a partir de este punto, la variación con respecto al tiempo no es relevante. Este tiempo se utilizará como parámetro para determinar la densidad de entrecruzamiento en pruebas posteriores. Los datos presentan una desviación estándar media de 0.00296 g y una máxima de 0.00262 g.

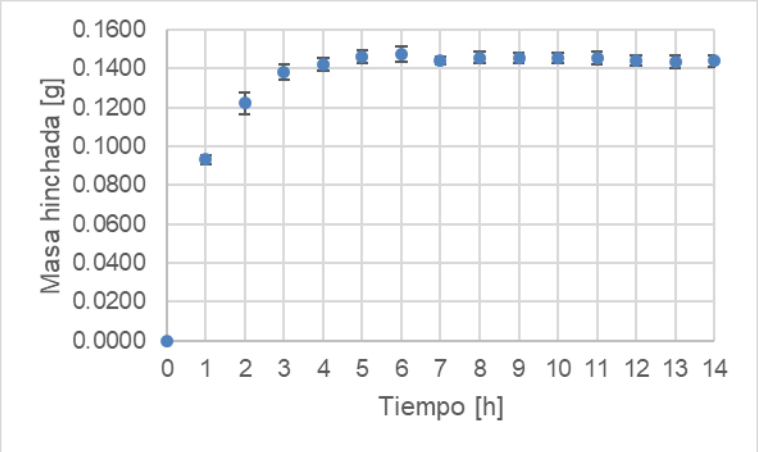


Figura 1. Gráfica de masa hinchada contra tiempo.

En el caso del caucho analizado sin tratar, se encontró que promedio de la densidad aparente de entrecruzamiento fue de 0.6991 mmol/g. Este valor se usará para determinar el porcentaje de desvulcanización de cada una de las muestras tratadas. Además, el parámetro indica el número de entrecruzamientos entre cadenas en una red polimérica [5], la modificación de este parámetro tiene un impacto notable sobre las propiedades del polímero. Una densidad alta le proporciona rigidez y estabilidad al estar bajo estrés mecánico o térmico, mientras que una baja densidad imparte propiedades de recuperación en los elastómeros.

4.2 Desvulcanización

Se obtuvo un porcentaje promedio de desvulcanización de 2.3197%. Este valor se obtuvo al seguir las condiciones descritas en artículo *New Route for Devulcanization of*

Rubber and the Properties of Devulcanized Rubber [13]. Por lo tanto, se comprobó que, siguiendo la metodología descrita, se consigue una desvulcanización del caucho residual. Esto se debe a que el agente desvulcanizante presenta una descomposición radicalaria, la cual origina radicales fenilos que atacan los enlaces carbono-azufre y azufre-azufre del caucho vulcanizado, generando dióxido de azufre y caucho desvulcanizado. Considerando este resultado como base, se modificaron las variables del proceso: agente desvulcanizante, tiempo de reacción, temperatura, concentración y agitación para incrementar el porcentaje obtenido.

4.3. Agente desvulcanizante

En la figura 2, se puede observar los tres agentes de desvulcanización utilizados con sus respectivos porcentajes de desvulcanización promedio.

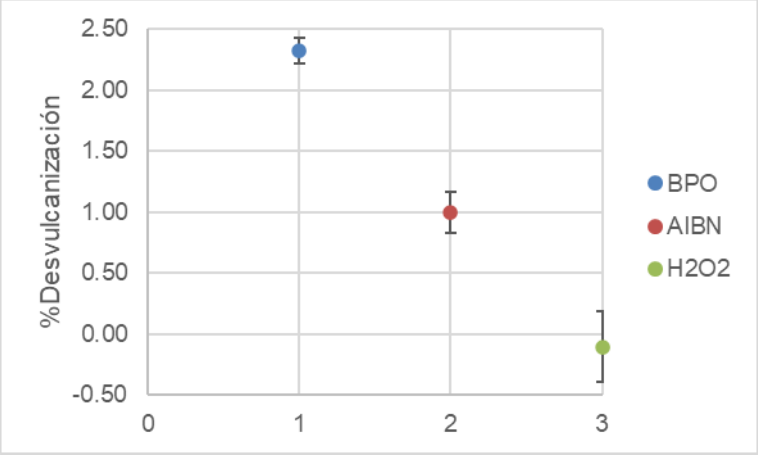


Figura 2. Gráfica de porcentaje desvulcanización con diferentes agentes desvulcanizante.

El promedio de los porcentajes de desvulcanización fueron de 2.3197% para BPO, 0.9948% para AIBN y -0.1035% para H2O2. El BPO obtuvo un porcentaje mayor debido a que el radical fenilo que se genera ataca de manera más efectiva al enlace S-S del caucho al vulcanizar, comparado con el radical 2-cianoprop-2-il generado por el AIBN.

Por otra parte, al utilizar el peróxido de hidrógeno, la reacción que se obtuvo fue de vulcanización. Esto puede deberse a que dicho reactivo puede ser utilizado como

agente vulcanizante; sin embargo, no es utilizado con frecuencia, pues su baja reactividad y eficiencia para el proceso de vulcanización. A pesar de que las muestras aumentaron su porcentaje de vulcanización, éste no fue significativo.

Por lo tanto, para las posteriores pruebas se utilizará como agente desvulcanizante el BPO, pues fue el que mejores resultados presentó. La desviación promedio de las muestras fue de 0.1915% y una máxima de 0.17105%.

4.4 Tiempo de reacción

En la figura 3, se puede observar los diferentes intervalos de tiempo que se utilizaron para realizar las pruebas. Se observó que la reacción de desvulcanización es reversible, por lo que no se alcanza una conversión total de reactivos a productos.

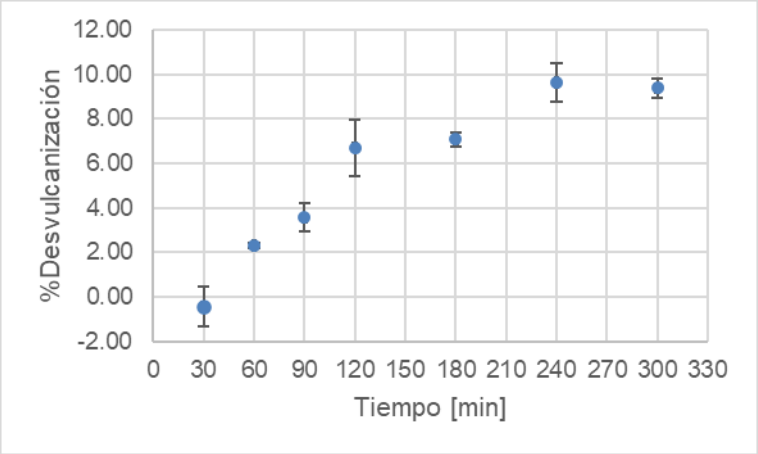


Figura 3. Gráfica del efecto del tiempo de reacción sobre el porcentaje de desvulcanización.

El porcentaje de desvulcanización máximo (9.6457%) se alcanzó en 240 min, pasando este punto, el porcentaje comienza a disminuir (9.3878%), indicando el punto de reversibilidad de la reacción. Por lo tanto, para las siguientes pruebas se utilizará como tiempo de reacción 240 min. La desviación promedio de las muestras fue de 0.1089% mientras que la máxima fue de 1.2755%.

4.5 Temperatura

En la figura 4, se puede observar las tres temperaturas a las que se llevó a cabo la reacción para realizar las pruebas. La optimización de la variable temperatura está limitada por dos temperaturas, por la de descomposición como límite inferior y la de autoignición como límite superior, 80 °C y 104 °C, respectivamente [3]. La máxima temperatura propuesta fue de 90 °C para trabajar por debajo de 107 °C de manera segura.

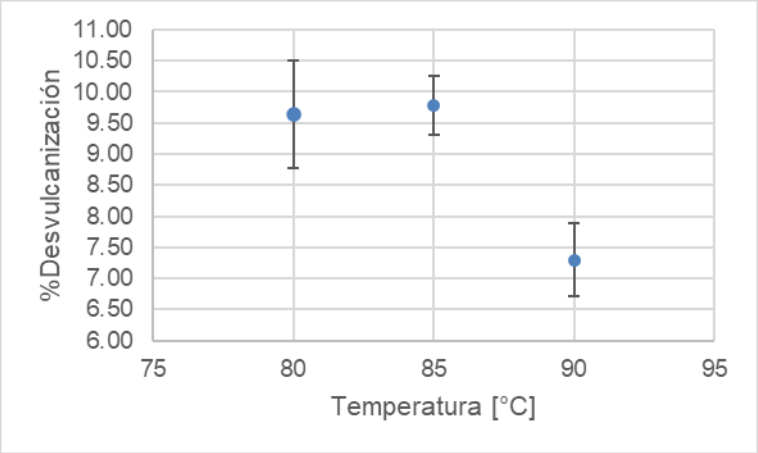


Figura 4. Gráfica del efecto de la temperatura sobre el porcentaje de desvulcanización.

Como se puede observar en la figura 4, la temperatura óptima para la desvulcanización utilizando BPO como agente es de 85 °C, con esta se obtuvo un porcentaje de 9.7833%. Respecto al límite inferior presenta un ligero aumento en el porcentaje de desvulcanización, mientras que para el límite superior el porcentaje disminuye considerablemente. Al incrementar la temperatura, la velocidad de reacción química aumenta, pues incrementa la energía cinética de las moléculas, así como el número de choques que da a lugar a la generación de productos. Sin embargo, al llevar a cabo la reacción a 90 °C, el porcentaje de desvulcanización es menor. Esto se debe a que un aumento de temperatura significativo afecta a las propiedades mecanoquímicas del caucho y consecuentemente, a la reacción [18].

Por lo tanto, la temperatura se utilizará para pruebas posteriores es la de 85 °C. La desviación promedio de las muestras fue de 0.6468% mientras que la máxima fue de 0.8708%.

4.6 Concentración del agente desvulcanizante

En la figura 5, se muestran las diferentes concentraciones que se utilizaron para realizar las pruebas. Se observó anteriormente que la reacción de desvulcanización es reversible, por lo que no se alcanza una conversión total de reactivos a productos. Esto implica que a medida que la reacción avanza los reactivos son regenerados en proporción más importante para la reacción en sentido inverso.

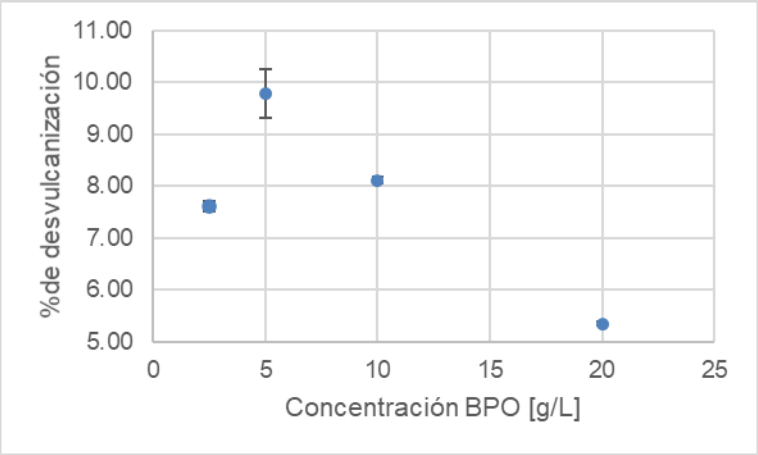


Figura 5. Gráfica del efecto de la concentración contra el porcentaje de desvulcanización.

Se observa que el valor máximo de desvulcanización (9.7833%) se encuentra a una concentración de 5 g/L. A partir de dicha concentración, la reacción se vuelve reversible, por lo que a una menor o mayor concentración que 5 g/L, el porcentaje de desvulcanización disminuye. Por lo tanto, para las siguientes pruebas se utilizará una concentración de 5 g/L. La desviación promedio de las muestras fue de 0.1762% mientras que la máxima fue de 0.4774%.

4.7 Agitación

En la figura 6, se puede observar las diferentes velocidades de agitación que se utilizaron para realizar las pruebas. La agitación favorece la difusión de los reactivos y, por lo tanto, a la reacción de desvulcanización. Cabe mencionar que se determinó como velocidad máxima 300 RPM, ya que a velocidades mayores se generaba un vórtice.

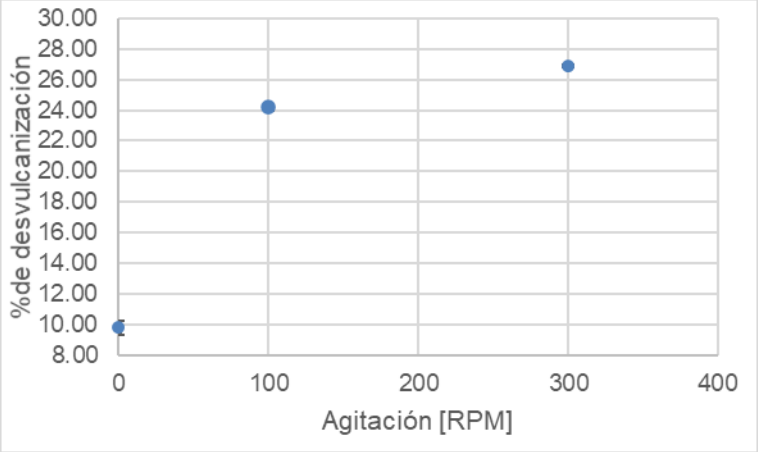


Figura 6. Gráfica del efecto de la agitación contra el porcentaje de desvulcanización.

Se observa que el valor máximo de desvulcanización (26.8636%) se obtuvo a 300 RPM. Esto se debe a que la agitación favorece la difusión de los reactivos y la colisión entre las partículas, favoreciendo la reacción de desvulcanización. La desviación promedio de las muestras fue de 0.2538% mientras que la máxima fue de 0.4774%.

5. Conclusiones

Se determinó las variables optimizadas del proceso para obtener el porcentaje más alto de desvulcanización 26.8636% son peróxido de benzoilo como agente desvulcanizante a una concentración de 5 g/L, un tiempo de reacción de 4 horas, una temperatura de 85 °C, aplicando una agitación de 300 RPM.

6. Referencias

1. Asaro, L., Gratton, M., Seghar, S., & Hocine, N. A. (2018). Recycling of rubber wastes by devulcanization. *Resources, Conservation and Recycling*, *133*, 250–262. doi: 10.1016/j.resconrec.2018.02.016
2. Fábrica de Neumáticos Francesa Michelín. (2016). *Process for drying a natural rubber* (WO 2017/207912 Al). Francia.
3. International Labour Organization. (abril 2002). *Peróxido de benzoilo.* International Labour Organization. Recuperado el 20 de febrero de 2020, https://www.ilo.org/dyn/icsc/showcard.display?p_lang=es&p_card_id=0225&p_version=2
4. Jana, G. K., Mahaling, R. N., Rath, T., Kozlowska, A., Kozlowski, M., & Das, C. K. (2007). Mechano-chemical recycling of sulfur cured natural rubber. *Polimery*, *52*(02), 131–136. doi: 10.14314/polimery.2007.131
5. Jenkins, A., Kratochvíl, P., Stepto, R., & Suter, U. (1996). Glossary of basic terms un polymer science. Recuperdo el 2 de marzo de 2020, de http://publications.iupac.org/pac/pdf/1996/pdf/6812x2287.pdf
6. Jiang K., Shi J., Ge Y., et al. (2012) Complete Devulcanization of Sulfur-Cured Butyl Rubber by Using Supercritical Carbon Dioxide. Beijing University of Chemical Technology. DOI: 10.1002/app.37542
7. Kruželák, J., Sýkora, R., & Hudec, I. (2017). Vulcanization Of Rubber Compounds With Peroxide Curing Systems. *Rubber Chemistry and Technology*, *90*(1), 60–88. doi: 10.5254/rct.16.83758
8. Logan, S. R., García-Pumarino, C. P., & Antonio, R. R. J. (2001). *Fundamentos de cinética química*. Madrid: Addison Wesley.
9. Matador Rubber s.r.o. (2007). *Rubber Chemsitry.* Vert. Recuperado el 23 de febrero de 2020, de https://laroverket.com/wp-content/uploads/2015/03/rubber_chemistry.pdf
10. Ramis, J.X. (1994). *Estudio de la Eficiencia de Sistemas Químicos de Iniciación del Curado de Resinas de Poliéster Insaturado* (Tesis doctoral). Universitat Politécnica de Catalunya, España.
11. Ripoli, E. (s.f.). *Ecuación de Arrhenius.* Proyecto Descartes. Recuperado el 20 de febrero de 2020, de https://proyectodescartes.org/ingenieria/materiales_didacticos/cinetica_quimica_descartes-JS/ecuacin_de_arrhenius_i.html
12. Ripoli, E. (s.f.). *La velocidad de reacción.* Proyecto Descartes. Recuperado el 20 de febrero de 2020, de https://proyectodescartes.org/ingenieria/materiales_didacticos/cinetica_quimica_descartes-JS/la_velocidad_de_reaccin.html
13. Rooj, S., Basak, G. C., Maji, P. K., & Bhowmick, A. K. (2011). *New Route for Devulcanization of Natural Rubber and the Properties of Devulcanized Rubber*. Journal of Polymers & the Environment, 19(2), 382–390. https://doi.org/10.1007/s10924-011-0293-5
14. Sabzekar, M., Chenar, M. P., Mortazavi, S. M., Kariminejad, M., Asadi, S., & Zohuri, G. (2015). Influence of process variables on chemical devulcanization

of sulfur-cured natural rubber. *Polymer Degradation and Stability*, *118*, 88–95. doi: 10.1016/j.polymdegradstab.2015.04.013
15. Sáez, V., Heráez, E., & Angulo, L. S. (2003). *Liberación Controlada de Fármacos Hidrogeles. Revista Iberoamericana De Polímeros*, 4 (1). Recuperado de http://ehu.eus/reviberpol/pdf/ENE03/Virginia2003.PDF
16. Smith, J. M., C., V. N. H., Abbott, M. M., & Swihart, M. T. (2018). *Introduction to chemical engineering thermodynamics*. New York, NY: McGraw-Hill Education.
17. Sripornsawat, B., Saiwari, S., Pichaiyut, S., & Nakason, C. (2016). Influence of ground tire rubber devulcanization conditions on properties of its thermoplastic vulcanizate blends with copolyester. *European Polymer Journal*, *85*, 279–297. doi: 10.1016/j.eurpolymj.2016.10.031
18. Sutanto, P., Laksmana, F. L., Picchioni, E., Janssen, L. P. B. M., & Picchioni, F. (2006). Modeling on the kinetics of an EPDM devulcanization in an internal batch mixer using an amine as the devulcanizing agent. Chemical Engineering Science, 61(19), 6442-6453. https://doi.org/(...)16/j.ces.2006.05.024

Estudio experimental del desempeño catalítico de formulaciones de trialquilaminas utilizadas en el proceso de caja fría (COLDBOX)

Rosas-Ramírez, F. de J., Sustaita-Martínez, J.I., Macías Valadez-Ávila, G., Ortega-Romero, C.M., Taxilaga-Pérez J.C.[2], Cruz-Gómez M. J.[1]

Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química[1],

Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), Ciudad Universitaria,

04510 Ciudad de México, México.

Centro de Desarrollo Tecnológico IDESA, PETRAMIN[2], Camino Viejo a Salamanca, Ciudad Industrial, 36541 Irapuato, Gto.

E-mails: **iqfer_rosas@hotmail.com**, jsustaita@idesa.com.mx, carlos.ort.rom@gmail.com, ger97@live.com.mx,

jtaxilaga@idesa.com.mx[2] y mjcg@unam.mx[1]

1. RESUMEN

Atender las nuevas demandas en el mercado, así como la constante investigación de los productos que se desarrollan para la industria, son clave para tener una dinámica constructiva con los nuevos y los actuales clientes. La meta del presente trabajo es generar conocimiento técnico a partir de investigación aplicada. El proceso de COLDBOX es utilizado ampliamente y aunque ya es plenamente conocido en su fundamento desde el siglo pasado, en los últimos 20 años han surgido fuertes cambios sobre todo en la innovación de resinas de poliol/poliisocianato y en las formulaciones de catalizadores amínicos. Dichas mejoras, persiguen mayores y mejores procesos de producción, optimizados en términos de calidad, tiempo, desempeño, etc. En el presente trabajo se reportan los resultados de resistencias a la tracción (cuyo parámetro está directamente relacionado con la calidad del molde y el desempeño catalítico), obtenidos de probetas hechas a nivel laboratorio a través del proceso COLDBOX, utilizando 4 formulaciones de catalizadores petramin 1, petramin 2, petramin 3 y petramin 4, así como dos proveedores de resinas (A y B). Las evidencias muestran que el desempeño catalítico de petramin 1 es ligeramente mejor que todas, incluso su sinergia con petramin 3 y petramin 4 es aceptable (para el proveedor A). Las resinas del proveedor A mostraron mejores resultados respecto del proveedor B, en cualquier caso de estudio. Estos comportamientos se observaron para cantidades de resinas del 1.3 y 1.5 %, cuyos porcentajes son los que usualmente se manejan a nivel industrial, para cubrir las demandas de resistencia de los diferentes moldes automotrices. La relación poliol/poliisocianato para obtener mejores resistencias, debe ser 50/50 en peso. Las caracterizaciones hechas con SEM de las probetas, confirman el mejor funcionamiento de petramin 1. Las caracterizaciones de resistencia a la tracción y de pesos moleculares (vía GPC) hechas a probetas de poliuretano del proveedor A sin arena, revelan que el sistema reactivo de la síntesis de poliuretano es totalmente diferente en presencia de arena y que para el proceso de COLDBOX se requiere de un catalizador que genere cadenas poliméricas relativamente grandes y con cierta dispersión para que sea efectivo el proceso de aglutinación.

2. INTRODUCCIÓN

La industria automotriz es una de las industrias más dinámicas y competitivas de México y de las que más aporta al crecimiento económico y a la generación de divisas. Según datos del 2019, aproximadamente el sector aporta el 3% del Producto Interno Bruto (PIB) nacional y 20.7% del PIB manufacturero, genera divisas por más de 88,000 millones de dólares al año, y es responsable de alrededor de 900,000 empleos directos en todo el país, a pesar de sufrir una fuerte caída del mercado respecto del 2018. México se mantiene como el primer lugar en exportación de tractocamiones en el mundo, por arriba de Alemania que hasta 2013 era el principal generador mundial de este tipo de vehículos y se ubica como el sexto productor de vehículos en el mundo (AMIA, 2019). Uno de los procesos de moldeo más utilizado en la industria automotriz para la fabricación de motores es el proceso de caja fría de poliuretano (PUCB, por sus siglas en inglés), debido a que es un método de alto rendimiento, especialmente apto para la producción de grandes series de piezas fundidas, y se caracteriza por la alta fiabilidad y productividad que ofrece, además de que proporciona mayor calidad en comparación con otros procesos de moldeo (Aguirre Rojo, 2013). De manera general, el proceso PUCB consiste en un sistema de 3 partes: arena, resinas y un catalizador. Primero, se prepara una mezcla de arena y resina, donde la función de las resinas es endurecer los moldes y corazones de arena fabricados por este proceso. La mezcla de arena con

resinas necesita de un agente de curado, que en este caso corresponde a una amina terciaria la cual actúa como catalizador. Esta amina terciaria, se gasifica a la mezcla de arena para acelerar la velocidad de curado, es decir, cuando el poli isocianato entra en contacto con el poliol, la acción catalítica de la amina inicia la reacción que conduce a la formación de un producto sólido de poliuretano, que es la responsable de unir los granos de arena en el molde (Martin & William R. Dunnavant, 1981). Diversas formulaciones como petramin 1, 2, 3 y 4, son producidas en PETRAMIN mediante reacciones catalíticas heterogéneas. El objetivo del presente trabajo es evaluar experimentalmente y a nivel laboratorio, la capacidad catalítica de algunas formulaciones desarrolladas con trialquilaminas, en la reacción de síntesis de poliuretano para el proceso COLDBOX. PETRAMIN S.A. de C.V. es una empresa que siempre busca nuevas áreas de desarrollo e investigación aplicadas que le permitan diversificar su mercado, innovar en ideas prácticas y mantenerse a la vanguardia, mediante el conocimiento profundo en el uso de sus productos que cubran con las necesidades de sus clientes, sin dejar a un lado su compromiso social y ambiental.

3. METODOLOGÍA DE EXPERIMENTACIÓN

Para el desarrollo experimental, se realizaron cargas de 600 a 800 g de mezcla (arena y resinas). Con dicha cantidad fue posible fabricar hasta 5 probetas, a las que se les midió su resistencia a la tracción, cada 15 minutos (0, 15, 30, 45 y 60 min). La metodología de trabajo se orientó a los siguientes puntos de interés:

- Cantidad mínima de catalizador requerida para fabricar una probeta completa que no presente defectos visiblemente externos.
- Comparación del desempeño de resistencias comparando 1.3 y 1.5 % de resina total para distintos catalizadores a una misma concentración.
- Comparación del desempeño de resistencias variando las proporciones de la parte I y parte II de la resina empleando un mismo catalizador. Las proporciones a probar, parte I/parte II, fueron: 60/40, 40/60, 65/35, 35/65, 30/70 y 70/30.
- Sinergias entre componente1/componente2 de resinas de diferentes proveedores (PrA y PrB).
- Sinergias entre formulaciones de catalizadores.

El sistema COLDBOX a nivel laboratorio está integrado por las siguientes secciones:

Tabla 1. Sistema COLDBOX.

Parte	Equipo	Figura

1. Vaporizador automático de amina		**Figura 1**
2. Soplador de piezas de arena		**Figura 2**
3. Máquina de prueba de tracción[1]		**Figura 3**

[1] Prueba de resistencia a la tracción (resistencia temprana para moldes COLDBOX).

Anónimo, “Operating Instructions; Catalyst vaporizer – Model 42109” (2015), publicado por: Simpson Technologies, Estados Unidos, pp. (7-24).

3.1 Sistema reactivo

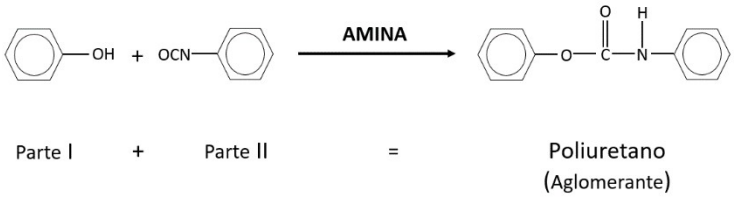
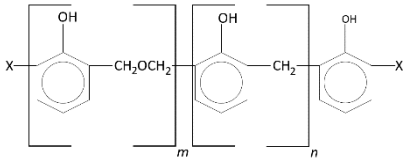
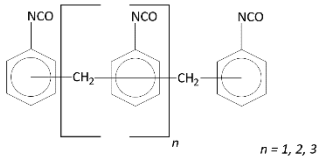
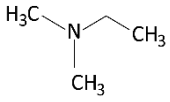
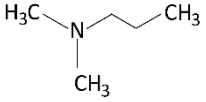
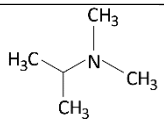
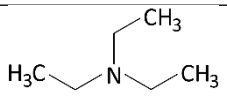


Figura 4. Representación genérica del sistema reactivo involucrado en la síntesis de poliuretano.

Para poder llevar a cabo la reacción de síntesis de poliuretano para el proceso de COLDBOX, se requirieron los siguientes reactivos, catalizadores y agregado:

Tabla 2. Sistema reaccionante para la síntesis de poliuretano en COLDBOX.

Reactivos comerciales	**Compuesto**	**Estructuras**

Parte I. Poliol[1]	Resina de fenol formaldehído	 **Figura 5**
Parte II. Poliisocianato[1]	MDI (metilendifenildiisocianato) polimérico	 **Figura 6**
Alquilaminas comerciales[2]	1. Parte activa DMEA (dimetiletilamina)	 **Figura 7**
	2. Parte activa DMPA (dimetilpropilamina)	 **Figura 8**
	3. Parte activa DMIPA (dimetilisopropilamina)	 **Figura 9**
	4. Parte activa TEA (trietilamina)	 **Figura 10**
Agregado	Arena malla 50	-

[1] Las partes I y II son formulaciones en tándem que comercialmente se adquirieron con dos proveedores (Proveedor A y B, referidos aquí como PrA y PrB, respectivamente).

[2] Son la parte activa de las formulaciones que se prepararon.

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realizaron pruebas con diferentes volúmenes de formulaciones de amina para determinar la cantidad mínima necesaria para obtener una probeta completa sin defectos como orillas incompletas o bordes frágiles. De acuerdo con los resultados, cuando la mezcla contiene 1.3% de resina total del proveedor A se requieren mínimo 70 a 90µL de petramin 1, 60 a 80µL de petramin 2 y 50 a 70µL para petramin 3 y petramin 4, y para un porcentaje de 1.5%, se requiere al menos 75 a 95µL de petramin 1, 70 a 90µL de petramin 2 y 55 a 75µL para petramin 3 y petramin 4. Para el proveedor B, se requiere menor cantidad de catalizador de manera general, para 1.3% de resina total son requeridos 60 a 80µL de petramin 1, 40 a 60µL de petramin 2, 30 a 50µL de petramin 4 y 25 a 45µL para petramin 3, mientras que para 1.5%, los valores son 60 a 80µL de petramin 1, 50 a 70µL de petramin 2 y 35 a 55µL para petramin 3 y petramin 4. Con un menor volumen de formulación y el mismo desempeño, petramin 3 y petramin 4 presentarían aparentemente mejores capacidades catalíticas respecto de petramin 1 y petramin 2, sin embargo, al ensayar las resistencias de dichas probetas, presentaban valores bajos y una gran variabilidad de resultados, además de deficiencias de curado interno. Para el caso de la petramin 1 y petramin 2, este efecto fue mínimo, por ello, se decidió tomar los valores máximos de dosificación de la petramin 1 y realizar los experimentos siguientes a una misma concentración de amina para observar el efecto catalítico de cada molécula de sustancia activa (amina).

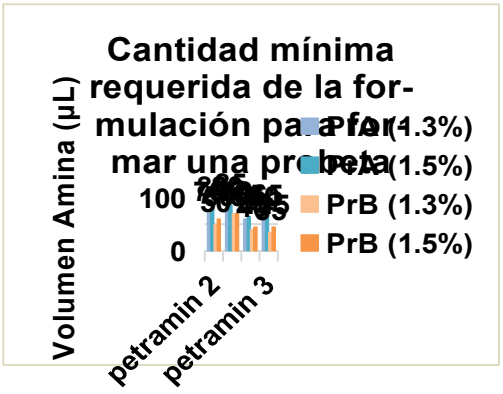


Figura 11. Volumen promedio mínimo necesario para fabricar una probeta sin defectos en COLDBOX.



Figura 12. Probetas con y sin defectos.

Como se puede observar en las figuras 13 y 14, utilizando la misma cantidad de amina en peso, los resultados de resistencias de las probetas con el proveedor A y B al 1.3% de resina total se observan en el siguiente orden para cada proveedor:

PrA: petramin 1 > petramin 3 > petramin 2 > petramin 4
PrB: petramin 2 > petramin 1 > petramin 4 > petramin 3

De manera análoga, para 1.5 % de resina total, el orden de resistencias es el siguiente:

PrA: petramin 1 > petramin 2 > petramin 3 > petramin 4

PrB: petramin 1 > petramin 3 > petramin 4 > petramin 2

Notoriamente las probetas fabricadas con el proveedor B son considerablemente inferiores en cuestión de resistencia de tracción que las del proveedor A. Incluso, el comportamiento de la resistencia en función del tiempo de curado es diferente entre resinas, para el PrA presenta un aumento en los primeros 15 minutos y después se mantiene prácticamente constante, mientras que, para el PrB las resistencias de las probetas se incrementan, después disminuyen y finalmente vuelven a subir. Para cualquier porcentaje de resina, el mejor desempeño mostrado fue el de petramin 1, aunque petramin 2 también destacó en algunas pruebas. Todas las probetas probadas para cualquier catalizador mostraban muy buena integridad externa e interna de curado.

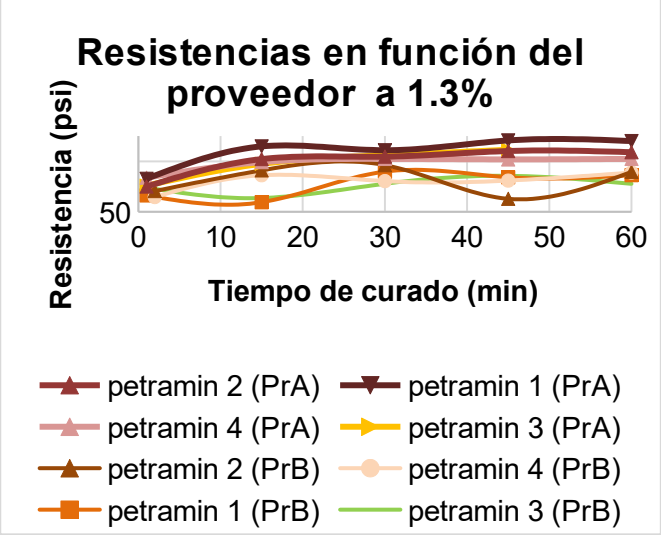


Figura 13. Resistencias en función del tiempo de curado para una misma concentración de amina para 1.3% de resina total.

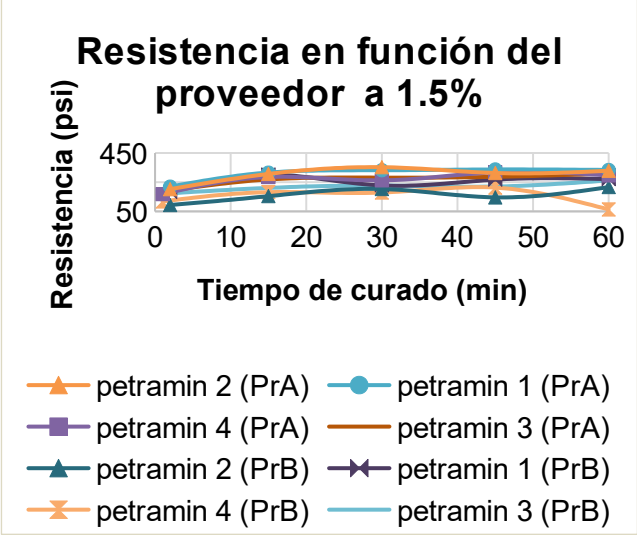


Figura 14. Resistencias en función del tiempo de curado para una misma concentración de amina para 1.5% de resina total.

Buscando obtener una posible ventaja entre las proporciones de parte 1 (poliol) y parte 2 (poliisocianato), se compararon los desempeños de resistencias variando las proporciones de parte I/parte II (para el caso del PrA) en: 60/40, 40/60, 65/35, 35/65, 30/70 y 70/30. Como se observa en la figura 15, se ratificó que la proporción de 50/50 es la más apropiada, pues generó mayores resistencias.

De las proporciones modificadas, aquellas en que la cantidad de parte I es mayor a la parte II muestran mejores resistencias, que en las que la parte II está en mayor cantidad, y no solo eso, además no lograban curar por completo, pues terminaban con malformaciones en las orillas o totalmente incompletas en la parte posterior a la que se hace la adición del catalizador. Cabe mencionar, que todas las pruebas anteriores a esta sección, fueron realizadas al 50/50. Con base en

las evidencias experimentales, esta sección y las subsecuentes fueron realizadas tomando como modelo a la formulación de petramin 1 por su mejor capacidad catalítica y con un porcentaje de 1.3 % de resina total por conveniencia. Los resultados observados en la figura 16 para el caso de las sinergias entre Parte 1/Parte 2 de resinas de diferentes proveedores (PrA y PrB), muestran los resultados en orden de resistencias:

PrA > Parte1(PrA)/Parte2(PrB) > PrB > Parte1(PrB)/Parte2(PrA)

Los resultados muestran principalmente que las partes 1 y 2 del proveedor A proveen mayores resistencias a diferencia de las generadas por el proveedor B. La parte 1 (poliol) otorga la mejor resistencia al poliuretano, ya que, en cualquier caso, cuando se emplea el poliol del PrA la resistencia es notablemente mayor que cuando se emplea el poliol del PrB.

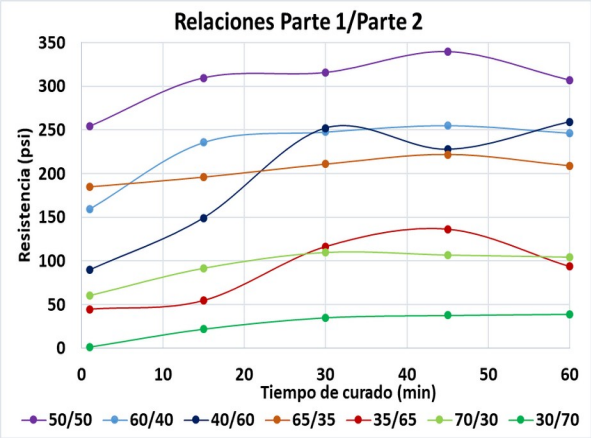


Figura 15. Resistencias obtenidas para diferentes relaciones de Parte I/Parte II, Proveedor A, petramin 1, 1.3% de resina total.

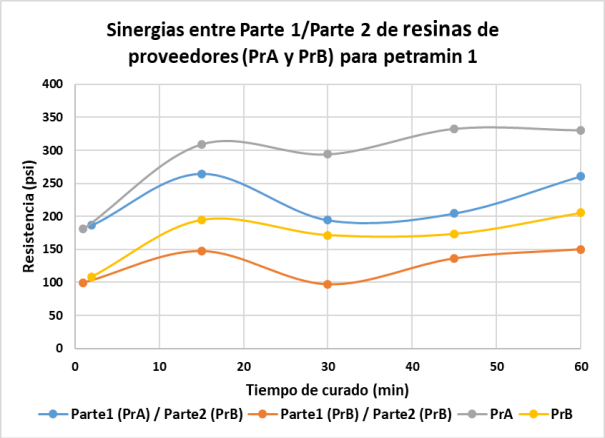


Figura 16. Resistencias obtenidas para sinergias Parte I/Parte II al 50/50, Pr A y Pr B, petramin 1, 1.3% de resina total.

Para la sinergia de formulaciones de catalizadores mostradas en la figura 17, se prepararon mezclas 50/50 en peso de petramin 2/petramin 1, petramin 4/petramin 1 y petramin 3/petramin 1. A continuación, se muestran los resultados en orden de resistencias para cada proveedor: **PrA** petramin 1 > petramin 4/petramin 1 > petramin 3/petramin 1 > petramin 2/petramin 1 y **Pr B** petramin 1 > petramin 4/petramin 1 > petramin 2/petramin 1 > petramin 3/petramin 1. En definitiva, para ambos proveedores, la formulación petramin 1 es la mejor opción, sin embargo, para el proveedor A el desempeño de la sinergia petramin 4/petramin 1 no se encuentra tan lejana, lo cual podría deberse a la compatibilidad estructural (isómeros). La mezcla petramin 3/petramin 1 presenta resistencias levemente menores a las de la mezcla petramin 4/petramin 1, mientras que la petramin 2/petramin 1 presenta en los primeros 15

minutos resistencias considerablemente menores (aprox. 60 psi) a las demás mezclas y a petramin 1, no obstante, sus resistencias a tiempos más largos (45 min.) son más parecidas a las de petramin 3/petramin 1. El punto de la media hora para petramin 2/petramin 1 tiene una resistencia muy baja e inusual, incluso por debajo de la desarrollada por la petramin 1 con el proveedor B. Para el PrB, no hay diferencias considerables entre las resistencias obtenidas por las mezclas, no obstante, se observa que a excepción de los primeros 15 minutos las resistencias de las sinergias son sustancialmente menores que las catalizadas por petramin 1.

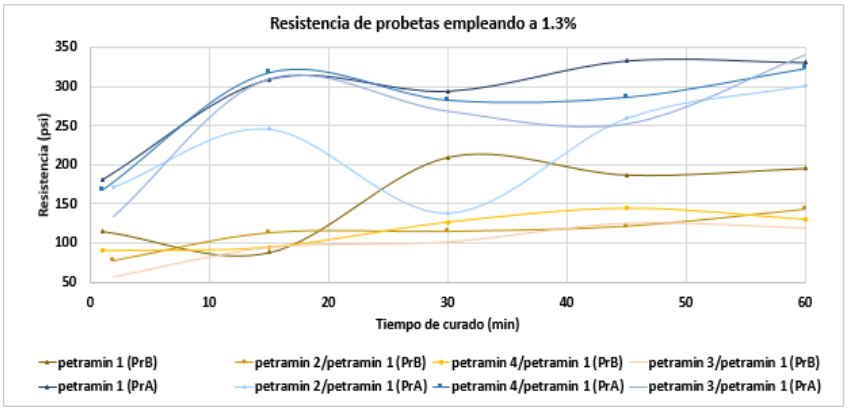


Figura 17. Resistencias de sinergias amínicas en función del tiempo, base 50/50 en peso para petramin 2, petramin 4, petramin 3/petramin 1, 1.3 % de resina total.

4.1 Microscopía electrónica de barrido (SEM) al sistema poliuretano con arena.

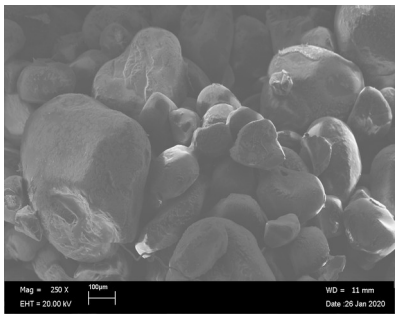


Figura 18. SEM petramin 1, 100 μm.

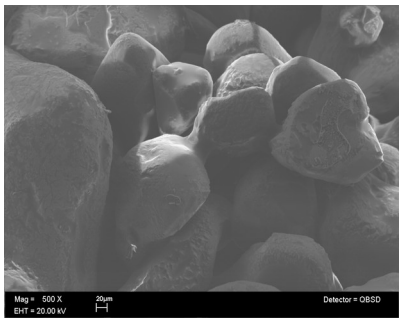


Figura 19. SEM petramin 1, 20 μm.

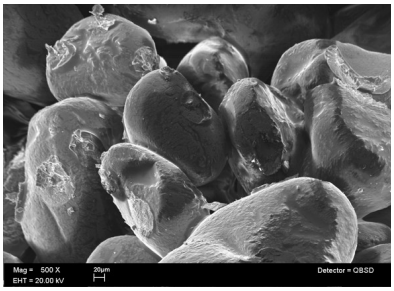


Figura 20. SEM petramin 2, 20 μm.

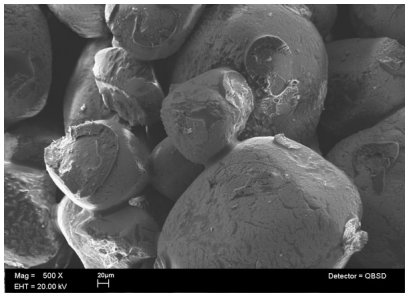


Figura 21. SEM petramin 3, 20 μm.

En las SEM obtenidas para las diferentes formulaciones de aminas, se puede observar que, para el caso de la formulación petramin 1, las superficies de los gránulos de arena se encuentran muy bien cubiertas y uniformes de poliuretano, además que los puentes de unión son sustancialmente más densos, lo que deriva en una mejor aglutinación en comparación con aquellos observados en las formulaciones de petramin 2 y petramin 3, en cuyas microscopías se pueden ver detalles de defectos de recubrimiento de poliuretano, además de uniones de poliuretano más sobrias entre los gránulos de arena. Las figuras 19, 20 y 21 poseen la misma distancia y resolución. Esto podría explicar el mejor desempeño de resistencias por parte de la petramin 1.

4.2 Pruebas de resistencia de tracción (prensa mecánica) y pesos moleculares (vía GPC) al sistema poliuretano sin arena

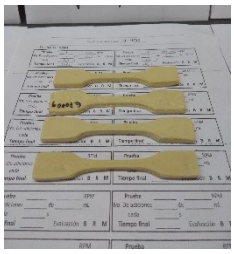


Figura 22. Probetas fabricadas con resinas para COLDBOX sin arena**.**

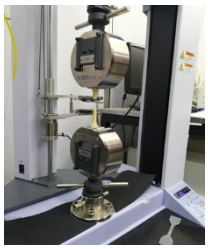


Figura 23. Prensa para pruebas de resistencia de materiales marca Shimadzu[1].

[1]*Esfuerzo-deformación, ASTM 638, Standard Test Method For Tensile Properties of Plastics.*

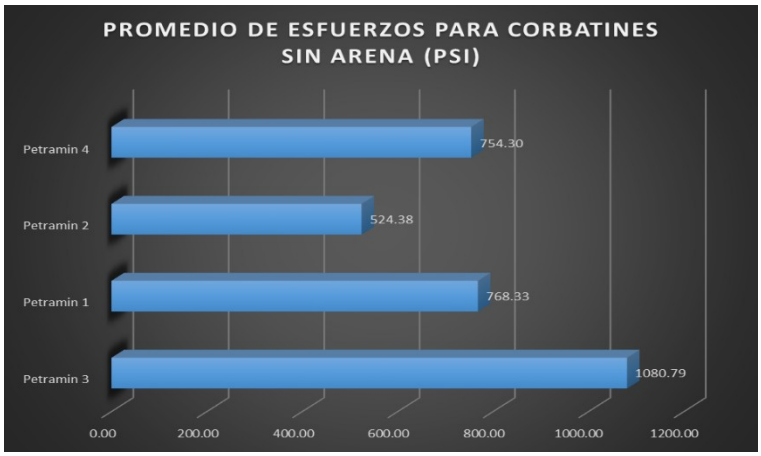


Figura 24. Promedio de esfuerzos a la tracción para sistema poliuretano sin arena.

Los valores de resistencia a la tracción observadas en la figura 24 muestran la siguiente tendencia: **petramin 3 > petramin 1 > petramin 4 > petramin 2**, obteniéndose para petramin 1, alrededor de un 70% de resistencia generada por la formulación petramin 3 y un valor apenas por encima de la formulación petramin 4. Dichos resultados no concuerdan con la tendencia mostrada anteriormente para las pruebas en probetas COLDBOX, debido a la ausencia de arena. Al ser un sistema sin arena, el desempeño catalítico únicamente depende de la capacidad reactiva del sistema poliol/poliisocianato y su interacción con el catalizador en cuestión. Para este caso la formulación petramin 3 parece tener un mejor funcionamiento como catalizador. De acuerdo con los resultados de pesos moleculares, el poliuretano de mayor peso molecular es el de petramin 1, seguido de petramin 2, petramin 3 y por último petramin 4 (ver figuras 25 y 26). Esta tendencia coincide con la capacidad de curado en las probetas de COLDBOX por lo que podrían estar correlacionadas. Al parecer, el poliuretano que se requiere para poder interactuar entre los intersticios de los gránulos de arena, necesita polimerizar en cadenas relativamente largas con pesos moleculares altos, pero con cierta variabilidad de distribución de cadena. Justamente esto último se atribuye, a que la arena a pesar de tener unas dimensiones más o menos similares, poseen simetrías y formas diferentes (ver figura 18).

	910	1,024	1.126
	189	198	1.046
PETRAMIN 3	121,249	161,881	1.335
	949	1,074	1.132
	194	204	1.050

Figura 25. PDI y PM número y masa (vía GPC[1]).

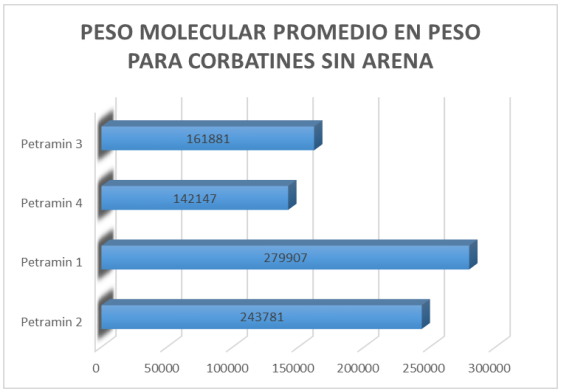


Figura 26. Peso molecular en masa.

[1] La técnica se determinó en un equipo de HPLC-RI con patrones de poliestireno.

El comportamiento reactivo con poliuretano sin arena es distinto del de COLDBOX, ya que la petramin 3 presenta la mayor resistencia con casi el menor peso molecular, lo que podría estar correlacionado con su tendencia a ser más monodisperso, lo que implica que, así como comúnmente sucede en polímeros, la uniformidad de cadenas poliméricas expresa un mejor desempeño del material. Petramin 1 presenta casi el doble de peso molecular que petramin 4, no obstante, sus resistencias son similares, lo que se presume que la formulación de petramin 4 podría favorecer entrecruzamientos poliméricos útiles en el sistema de poliuretano sin arena, por lo que su polímero formado a pesar de no ser de alto peso molecular, genera una resistencia aceptable. Sin embargo, esto no es tan sustancialmente efectivo en el sistema COLDBOX, a menos que actúen en sinergia con la formulación petramin 1, como se puede ver en los resultados de la figura 17.

5. CONCLUSIONES

La formulación cuya sustancia activa es la petramin 1 mostró los mejores desempeños catalíticos, aunque los generados por las demás aminas no son despreciables, en especial la petramin 2. En términos de sinergias, petramin 4/petramin 1 y petramin 3/petramin 1 presentaron un desempeño parecido al de la petramin 1, al menos para el proveedor A. Dicho proveedor mostró en cualquier caso los mejores resultados de resistencias en comparación con el proveedor B. Para obtener mejores resistencias es siempre apropiado utilizar una relación parte 1/parte 2 igual a 50/50 en peso. Las evidencias obtenidas por SEM, respaldan los resultados obtenidos. Los sistemas

reactivos de poliuretano, con y sin arena, funcionan de manera totalmente diferente, debido al tipo de cadenas poliméricas requeridas para hacer el proceso de aglutinación con la diversidad de formas y tamaños de los gránulos de arena.

6. AGRADECIMIENTOS

Se agradece a la Dirección General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) por el apoyo financiero a través del proyecto IT101919 del Programa de Apoyo a Proyectos de Investigación Aplicada e Innovación Tecnológica (PAPIIT), asimismo extendemos las gracias al personal técnico del Centro de Desarrollo Tecnológico IDESA, así como el apoyo de la empresa PETRAMIN S.A. de C.V.

7. BIBLIOGRAFÍA

Aguirre Rojo, I. (2013). *Uso de nanopartículas de carbono en la fabricación de corazones de arena para la fundición de aluminio (Tesis de doctorado).* UANL, Ciudad Universitaria, Nuevo León.

Albrecht, W., & Stephenson, R. (1988). *Health hazards of tertiary amine catalysts*. Scandinavian Journal of Work, Environment & Health, 209-219.

Anónimo (2019). *Boletín de Prensa de Cifras 2019.* Asociación Mexicana de la Industria Automotriz, México.

Anónimo, (2015). *Operating Instructions; Catalyst vaporizer – Model 42109* Simpson Technologies, Estados Unidos, 7-24.

Barrera Franco, A., & Pulido Morán, F. (2016). *Cuadernillo La industría Automotriz Mexicana: situación actual, retos y oportunidades.* PROMÉXICO: Secretaría de Economía. Ciudad de México

Campos Moreno, A. (2005). *Desarrollo e implementación de pruebas de laboratorio para arenas de fundición (Tesis de grado).* Universidad Centroamericana , El Salvador.

Anónimo. (2015). *Centro de Estudios de Finanzas Públicas.* Obtenido de La Industria Automotriz y el Sector Externo de México: Boletín sectorial: Industria y comercio exterior. México.

Diether-KochJens, M.-C. R.-H.-B. (2008). *Process for making foundry shaped cores and for casting metals 1955791A1.* Francia.

Gónzalez L., J. R., Colás, R., & Valtierra, S. (2011). Characteristics of Phenolic-Urethane Cold Box Sand Cores for Aluminum Casting. *American Foundry Society*, 41-48.

Gutsche, C. D., & Pasto, D. J. (1978). *Fundamentos de química orgánica.* Ed. Reverté. España.

J. Skoglund , M. (2001). *Patente nº 6288139B1,* Dublin.

Khandelwal, H., & Ravi, B. (2016). *Effect of molding parameters on chemically bonded sand mold properties*. Journal of Manufacturing Processes, 127-133.

Martin, R. D., & William R. Dunnavant, G. P. (1981). *Urethane Binder compositions for no-bake and cold box foundry application utilizing isocyanate-urethane polymers US4293480A.* Estados Unidos.

Pilato, L. (2010). *Phenolic Resins A Century of Progress.* Springer, Estados Unidos.

Pius Schmid, H., & Karlskoga. (1976). *Patente nº 3933727,* Suiza.

Robins, J. (1971). *Patente nº 3676392, Houston, Texas.*

Sáenz Valdez, A. (2010). *Desarrollo de un aglutinante inorgánico para la producción de corazones de arena en la industria automotriz (Tesis de maestría).* UANL, Ciudad Universitaria, Nuevo León.

Svidró Tamás, J., Diószegi, A., Svidró, J., & Ferenczi, T. (2017). *The effect of different binder levels on the heat absorption capacity of moulding mixtures made by the phenolic urethane cold-box process.* J Therm Anal Calorim, 1769-1777.

Villabon Ahumada, W. (2016). *Diseño de una nueva línea de moldeo en sistema de cold box para la planta de fundición de Fundicom Mosquera (Tesis de grado).* Universidad Distrital Francisco José de Caldas, Bogotá.

Villacís Tulcán , E. N. (2015). *Análisis de la conducta de mezclas de moldeo para fundición aglomeradas con resinas autofraguantes fenólico uretanas (Tesis de grado).* Escuela Politécnica Nacional, Quito.

7. Implementación de un método electroquímico para la remoción de sólidos disueltos en agua residual Urbana de la planta de Hidrosistemas de San Román en Córdoba Veracruz

Sánchez, B. I.,[1] Juárez, R. V.,[2] Gutiérrez, C. N., [1] Diaz, C. K.,[1] Hernández, A. E.,[1] Aranda, P. A. S.,[1] Sánchez, B. L. A.,[1]

[1]Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Orizaba, Veracruz, México.

[2]Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería, Ixtaczoquitlán, Veracruz, México.

igsanchez@uv.mx, vijuarez@uv.mx, nagutierez@uv.mx, kadiaz@uv.mx, eduherandez@uv.mx, araranda@uv.mx, luisasanchez@uv.mx

1. Resumen

Las aguas residuales urbanas son un problema que dañan la vida del ecosistema acuático. Los sólidos suspendidos generados por agua residual requieren ser tratados a través de nuevas alternativas cuyo objetivo principal es aportar una solución. Una alternativa es la electroquímica, esta se define como el proceso donde se utiliza carga eléctrica y electrodos para degradar sustancias. Actualmente se utiliza en el tratamiento de aguas residuales, debido a que es un proceso versátil que representan una tecnología limpia, económica, sencilla y bajo costo de operación, donde se generan pocos residuos y materiales tóxicos. La ciudad de Córdoba, Veracruz,

México, presenta grandes problemas de contaminación de agua en sus afluentes, aunado, sus plantas de tratamiento de aguas residuales están inactivas, por ello, se implementa la electroquímica para la degradación de solidos, Dureza, Dureza de Calcio, aceites y grasas con cinco voltajes diferentes en un lapso de tres horas. Determinado que el optimo para dicha operación es voltaje de 80 V en tiempo de 2 horas.

2. Introducción

La contaminación ha sido originada a partir de las actividades del hombre desde que este comienza a manejar el fuego para su beneficio. Antes se sufría la contaminación natural por erupciones volcánicas o incendios espontáneos. Actualmente a medida que la población se incrementa la contaminación lo hace igual, presentando niveles que puedan alterar la salud de los seres vivos y también de los ecosistemas[1]. Al mundo se le conoce como el planeta azul ya que tres cuartas partes de éste, está constituida por agua, está en forma de mares, ríos y lagos. Ningún ser vivo puede prescindir del agua por ello esta relación marca las posibilidades de vida que tenemos como especie humana ya que constituye el 70% de composición de todos los seres vivos. En México, una problemática radica en que se presentan una contaminación alarmante en ríos, arroyos, lagunas y mares, esto se debe a la descarga incontrolada de aguas residuales sin tratamiento el cual contamina los recursos hídricos superficiales y subterráneos, propiciando la transmisión de enfermedades debido a la presencia de elementos químicos y bacteriológicos. Por ello, es necesario proponer alternativas de tratamientos de aguas residuales que implementen procesos actuales y versátiles. A través de la utilización de procesos que se pueden englobar en anaerobios, aerobios y mixtos estos involucran diversas técnicas[2].

En la ciudad de Córdoba, Veracruz, cuenta con una población estimada de 132, 091 habitantes, los ríos de esta ciudad presentan grandes problemáticas debido a la descarga de drenaje de la ciudad y la de los residuos sólidos en las riberas del rio, toda esta agua de ríos no presentan ningún tratamiento para reducir sus contaminantes y eliminar los agentes químicos más peligrosos para aumentar la calidad de vida de esas familia y el futuro de las próximas generaciones[3]. Una de las técnicas para el tratamiento de aguas residuales alternativas es la electroquímica, está adquiere relevancia gracias a su bajo costo de instalación, mantenimiento y operación, fundamentándose en el flujo de corriente eléctrica a través de ánodos y cátodos para la remoción de metales y materia orgánica en el seno de las soluciones propiciando electrodeposición. La presente investigación tiene la finalidad implementar un proceso electroquímico para el tratamiento de aguas residuales urbanas en la planta de Hidrosistemas en San Román en la ciudad de Córdoba, donde se implementará un método electroquímico empleando electrodos de aluminio que se conoce su eficacia para la degradación de grasas, detergente y aceites, además de electrodos de Hierro o Fierro eficaz para la degradación de metales y materia orgánica, al agua residual de esta planta de tratamiento, al realizarán las pruebas electroquímicas y determinar que hasta un 35% de remoción de contaminantes del agua residual urbana.

3. Condiciones experimentales

En la *Figura 1* se presenta la metodología experimental del proceso electroquímico para disminuir los niveles contaminantes del agua residual urbana en la planta de tratamiento de la Colonia San Román en la Ciudad de Córdoba, Veracruz, México, primeramente se obtiene el agua residual, para posteriormente realizar el análisis preliminar y poder compararla con el agua tratada electroquímicamente, determinado la correlación que existe entre el tiempo de experimentación, el voltaje y la cantidad de solidos que se degrada, a través de un las tres horas de experimentación.

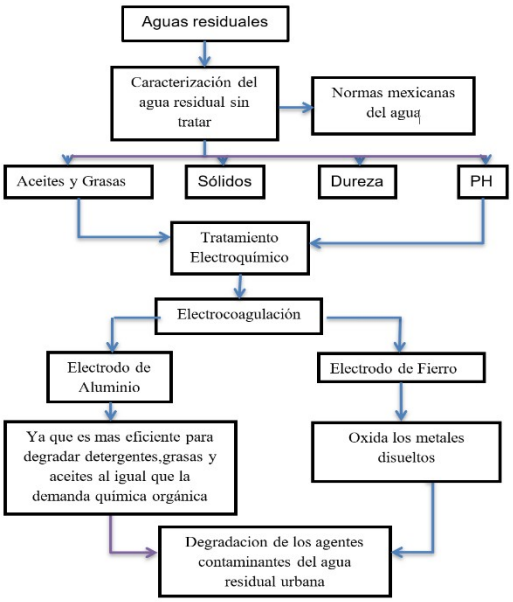


Figura 1. Metodología del tratamiento electroquímico del agua residual urbana

3.1 Análisis preliminares

Estos se realizar para tener la certeza de que este método electroquímico de electrocoagulación es efectivo y determinar el tiempo donde se lleva a cabo la reacción de los electrodos con el agua residual aplicando 100 V durante 3 horas, pasado el tiempo se observa la claridad del agua y en el fondo se puede ver la acumulación de flóculos contaminantes sedimentados y en la parte superior las espumas que es el hidrógeno desprendido en el experimento.

3.2. Ubicación de la toma de muestras de agua residual

La muestras son tomas en la colonia de San Román de la ciudad de Córdoba, Veracruz para realizar los análisis pertinentes. En la *Figura 2(a)* se muestra el mapa vía satelital de la planta esta se encuentra sobre la Av. Santa Rosa detrás de la iglesia Espíritu Santo y en la *Figura 2(b)* se visualiza la planta en condiciones reales.



(a) (b)

Figura 2. (a) Mapa de localización de la planta y (b) Planta de tratamientos de agua residual

3.3 Sistema electroquímico

El reactor fue construido con polietileno a escala 1:1000 el cual fue dividida en dos partes para manejar diferentes voltajes en cada parte del reactor. El diseño corresponde a una similitud de los tanques de Imhoff de la planta de tratamiento de San Román en la Ciudad de Córdoba, ya que son tanques alargados con cierta profundidad que cuenta la planta tratamientos de agua de Hidrosistemas de Córdoba, Veracruz. Se utilizó un cantidad de tres litros de agua residual urbana de dicha planta para cada prueba, las cuales se llevaron a cabo en un tiempo de tres horas, tomando una muestra de agua residual cada hora para realizar los análisis pertinentes del degradado de solidos disueltos, pH, dureza total, aceites y grasas. En la *Figura 3* se presenta el diagrama del reactor electroquímico que se diseñó, con una distancia de 10.5 cm entre electrodos.

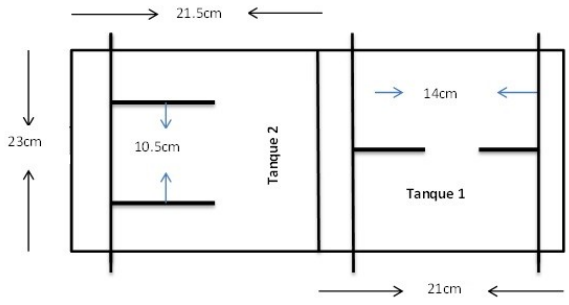


Figura 3. Distribución del reactor electroquímico diseñado

3.4. Caracterización del reactor

Se realizan cinco pruebas con diferencia de voltaje los cuales fueron 1V, 5V, 50V, 80V y 100V durante un lapso de tres horas, tomando muestras cada hora, en cada experimento se mantiene estable el potencial.

3.5. Cálculo del tiempo de residencia

Se realiza el cálculo de este parámetro para obtener el Tiempo en que la sustancia reacciona en el reactor y obtener mejores resultados en la degradación de los agentes contaminantes del agua residual urbana. Mediante la aplicación de la ecuación 1 donde tiempo de residencia T_R, volumen de reactor V_R, caudal volumétrico Q_V.

$$T_R = \frac{V_R}{Q_V} \quad (1)$$

3.6. Análisis fisicoquímico de las muestras de agua residual urbana

Se realiza el análisis fisicoquímicos con forme a las normas mexicanas que se muestran en la *Tabla 1*, los cuales son: determinación de sólidos totales, sólidos suspendidos, pH, dureza de agua, aceites y grasas de forma inicial aplicar el tratamiento electroquímico y para obtener los resultados de la degradación a diferentes voltajes, comparar dichos resultados de degradación.

Tabla 1. Normatividad Mexicana Analisis de agua residual

Determinación	Norma
Solidos Totales	NMX-AA-034-SCFI-2015
Solidos Suspendidos	NMX-AA-034-SCFI-2015
pH	NMX-AA-008-SCFI-2011
Dureza del Agua	NMX-AA-072-SCFI-2001
Determinación de dureza de calcio	NMX-AA-072-SCFI-2001
Aceites y Grasas	NMX-AA-005-SCFI-2013

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se presentan los resultados obtenidos de los análisis del agua residual urbana donde se mostraran los análisis con diferentes voltajes cada uno ellos con respeto al tiempo. Se llevó acabo el cálculo con las fórmulas que anteriormente se mencionaron, donde el tiempo de residencia es 0.000833 h/m^3 en el reactor que se diseñó.

4.1. Análisis del Agua Residual no tratada

Se llevó a cabo la experimentación de la muestra de agua residual sin tratar para obtener los resultados preliminar, el análisis de pH se tiene un valor neutro de 7.6 este se encuentra entre los rangos permisibles de 5.5 y 10, el análisis de aceites y grasas presenta un resultado de 10.13 mg/L se encuentra por debajo basado a la norma mexicana: NOM-002-ECOL-1996 donde nos indica que el límite máximo permisibles es de 75 mg/L. El análisis de sólidos disueltos totales presenta un valor de 138 mg/L este se encuentra por abajo de los datos permisibles que es de 500 mg/L; el análisis de sólidos totales volátiles presenta un valor de 86 mg/L el cual se encuentran por debajo de los datos permisibles de 300 mg/L señalado por las normas oficial mexicana:NOM-127-SSA1-1994; el análisis de sólidos suspendidos totales presenta un valor de 140 mg/L este esta por arriba del valor permisibles de 125 mg/L y el análisis de sólidos suspendidos volátiles se obtiene el valor de 102 mg/L el cual nos indica que se encuentra por arriba del valor permisible de 80 mg/L esto debido a que presentan de sólidos mayor tamaño señalados por la NOM-001-SEMARNAT-1996.

Para el análisis de la dureza de agua en presenta 556.46 ppm por ello el agua es dura y está por arriba de los datos permisibles de la dureza total que es de 150-300 ppm, para la dureza de calcio presenta 388.35 ppm en comparación con el valor permisible de 100 ppm y para dureza de magnesio presenta un valor de 168.11 ppm esta por encima del valor máximo permisible de 50 ppm basado a la norma NOM-001-ECOL-1996, como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Analisis de agua residual sin tratar

Parámetro	Valor (Norma)	Valor (Análisis)
pH	5.5 - 10	7.6
Grasas y Aceites	7.5 mg/L	10.13 mg/L
S. Totales	500 mg/L	138 mg/L
S. Totales Volátiles	300 mg/L	86 mg/L
S. SuspendidosTotales	125 mg/L	140 mg/L
S. Suspendidos Volátiles	85 mg/L	102 mg/L
Dureza Total	150-300 ppm	556.46 ppm
Dureza Calcio	100 ppm	388.35 ppm
Dureza Magnesio	50 ppm	168.11ppm

4.2. Perfil de pH, Grasas y Aceites del Agua Residual tratada con electroquímica

En la *Figura 4* se muestra como tiempo 0 el valor del análisis de pH sin tratamiento electroquímico se puede observar que a mayor aumento del potencial, el pH se vuelve más acido, esto se debe a la reacción que se da en el electrodo de aluminio donde se libera hidrogeno. Es favorable aplicar un potencial de 1 V a 50 V ya que los valores de pH se encuentran permisibles dentro de la norma oficial mexicana de 10-5.5 pH. En la *Figura 5* se presentan los resultados de aceites y grasas a diferentes voltajes donde se analiza la degradación a mayor aumento de potencial en cada experimento. Se tiene los valores de aceites y grasas en el agua residual dentro del limite permisible para cada experimento, no es necesario reducir los niveles de aceites y grasas en el agua residual pero a pesar de ello ante cualquier eventualidad futura donde se excedan estos niveles, es factible aplicar un potencial de 50 V a 80 V para su la degradación.

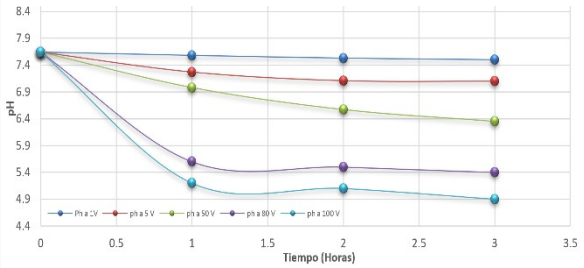


Figura 4. Perfiles de pH vs Voltaje-Tiempo

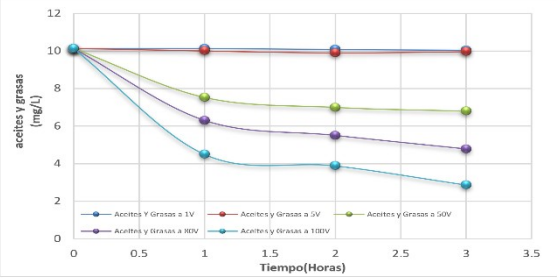
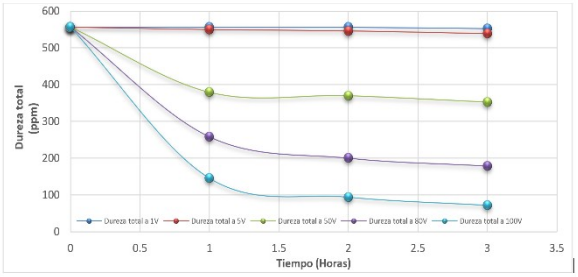


Figura 5. Perfiles de grasas-aceites vs voltaje-tiempo

4.3. Perfil de Dureza Total, Calcio y Magnesio del Agua Residual tratada con electroquímica

En la *Figura 6* se presenta como se degrada la dureza total con respecto al tiempo comparando los cinco experimentos donde se muestra que es más eficaz utilizar un potencial entre 50 V a 100 V ya que los resultados de los análisis se encuentran entre los datos permisibles bajo las normas mexicanas. En la *Figura 7* las curvas que se presentan una mayor remoción son de 80V a 100V en 1 hora transcurrida es debido a que el primer valor de tiempo 0 hora es con respecto al resultado del análisis del agua residual sin tratar y es más eficaz. Los resultados obtenidos en los análisis se encuentran dentro limites permisibles bajo las normas mexicanas.



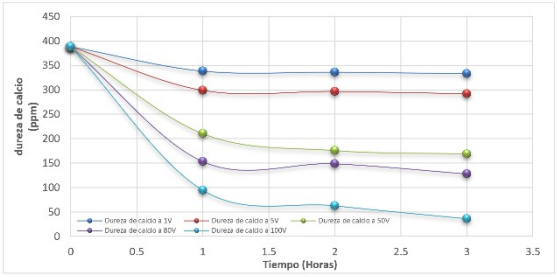


Figura 6. Perfiles de dureza total vs Voltaje-Tiempo *Figura 7. Perfiles de dureza de Ca vs Voltaje-Tiempo*

En la figura 8 se muestra la degradación de la dureza de Magnesio con respecto al tiempo comparando los cinco experimentos, con lo anterior es mas eficiente utilizar el potencia de 100 V ya que cumple con los datos permisibles basado en la norma mexicana.

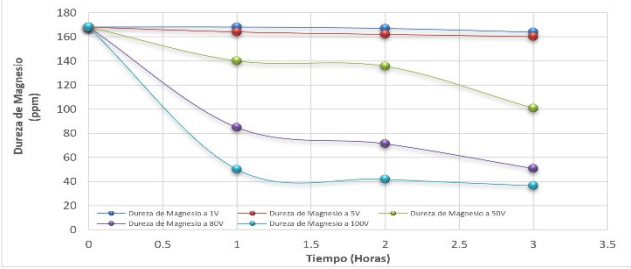


Figura 8. Perfiles de dureza de Mg vs Voltaje-Tiempo

4.4. Análisis de solidos del Agua Residual tratada con electroquímica

En la Tabla 3 se presenta los resultados de la experimentación de Solidos del agua residual sometida a tratamiento electroquímico, se consideran cinco diferentes niveles de voltaje a lo largo de tres horas de experimentación. Inicialmente se tiene los valores de Solidos Totales y Solidos Totales Volátiles dentro de los niveles permisibles en las normas Mexicanas, y fuera de los valores norma los solidos Suspendidos Totales y solidos Suspendidos Volátiles a pesar de ello ante cualquier eventualidad futura donde se excedan estos niveles, es factible aplicar en método de remoción de solidos empleando electroquímica, a través un análisis estadístico para correlacionar la degradación con respecto al voltaje.

Tabla 3. Resultados de Solidos del agua resudial Tratada a diversos Voltajes

Parámetro	**AGUA RESIDUAL TRATADA**				
(Mg/L)	**1 V**	**5 V**	**50 V**	**80 V**	**100 V**

Tiempo (Horas)	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3
S. Totales	138	138	137.8	137	136.5	135.2	123	122.3	120	116	113	108	99.6	92	83.7
S. Tot. volátiles	85	85	83.4	82.7	81.6	80	75.6	73.7	72	69.3	68.3	64.5	56.4	55	51.4
S. Susp. Tot.	140	139	138	137	135.6	132.4	130	128.2	125.3	120	118	109.4	110.2	98.3	94.8
S. Susp. volátiles	102	101	100	98.2	96.8	94.8	91.8	90.2	88.2	85	83	80	73.2	71.2	68

A través de un modelo lineal se generan los gráficos de medias ajustadas para los efectos principales de solidos y la correlación del tiempo-voltaje, en la Figura 9 se presenta la medias ajustadas de solidos Totales donde se obtiene que la mejor correlación es el tiempo dos que corresponde a la segunda hora de experimentación y el voltaje uno que corresponde a 1V de experimentación, en la Figura 10 se presenta el mismo efecto en las medias ajustadas para los solidos Totales Volátiles donde la mejor correlación es la segunda hora de experimentación y el voltaje uno que corresponde a 1V de experimentación.

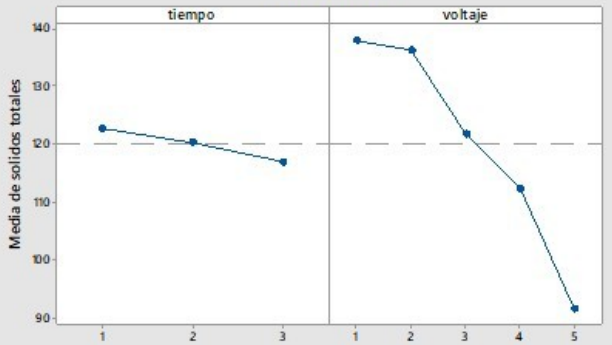


Figura 9. Grafica de medias Ajustadas para solidos totales

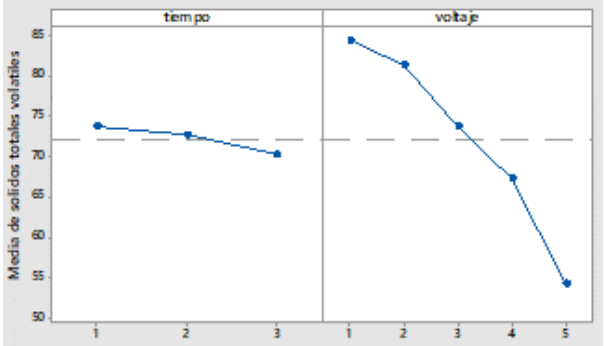


Figura 10. Grafica de medias Ajustadas para solidos totales volátiles

A través de un modelo lineal se generan los gráficos de medias ajustadas para los efectos principales de solidos Suspendidos y la correlación del tiempo-voltaje, en la Figura 11 se presenta la medias ajustadas de solidos Suspendidos Totales donde se obtiene que la mejor correlación es el

tiempo dos que corresponde a la segunda hora de experimentación y el voltaje cuatro que corresponde a 80V de experimentación ya que con esta relación se ajusta a los parámetros de la norma que tiene un valor permisible de 125 mg/L, en la Figura 12 se presenta el mismo efecto en las medias ajustadas para los solidos Suspendidos Volátiles donde la mejor correlación es la segunda hora de experimentación y el voltaje cuatro que corresponde a 80V de experimentación, ya que con esta relación se ajusta a los parámetros de la norma que tiene un valor permisible de 85 mg/L.

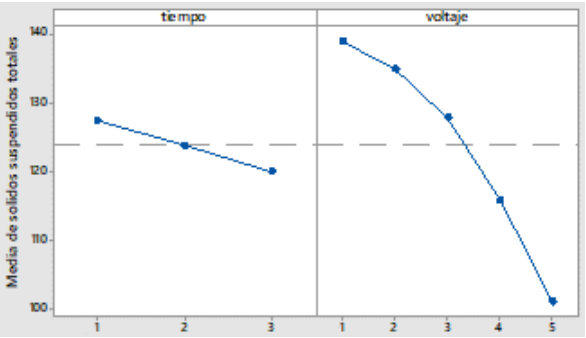


Figura 11. Grafica de medias Ajustadas para Solidos Suspendidos Totales

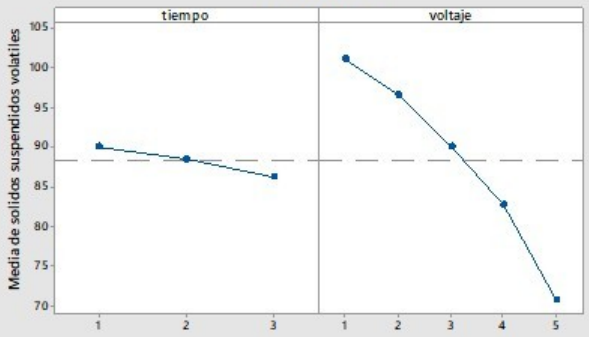


Figura 12. Grafica de medias Ajustadas para Solidos Suspendidos volátiles

Se genera un análisis estadístico de varianza (anova), estos resultados se presentan en la tabla 4. Determina la correlación de solidos y Voltaje-Tiempo, para los parámetros: Solidos Totales, Solidos Totales volátiles, Solidos Suspendidos Totales y Solidos Suspendidos Volátiles, en base al valor "Pearson" que especifica una asociación positiva entre el voltaje y el tiempo de experimentación, ya son factores que determinan la degradación de dichos solidos, al presentar un valor tendiente a "Cero". También se analiza que el porcentaje de determinación múltiple tiene un error menor al 5 % con ello el ajuste es adecuado.

Tabla 4. Análisis de correlacion de parametros de Solidos, el tiempo de experimentación y el voltaje

Parámetro	Fuente	Grad. Libert.	S C Ajust.	M C Ajust.	Valor P	S	R Cua. (%)	R Cua. Ajust. (%)	R Cua. Predeterm.
S. Totales	T(hr)	2	84.46	42.2	0.05	3.18	98.19%	96.83%	93.64%
	V	3	4332.4	1083.1	0.00				
S. Tot.	T(hr)	2	32.9	16.4	0.00	0.79	99.71%	99.50%	99.00%
	V	3	1749.3	437.3	0.00				

volátiles									
S. Susp.	T(hr)	2	139.1	69.5	0.01	3.14	97.43%	95.50%	90.97%
Tot.	V	4	2856.0	714.0	0.00				
S. Susp.	T(hr)	2	37.2	18.6	0.00	0.66	99.80%	99.64%	99.29%
volátiles	V	4	1713.7	428.4	0.00				

Para futuros trabajos de generan ecuaciones de regresión Lineal que permiten correlacionar los cinco niveles de voltaje con respecto a las tres horas de experimentación y las intenciones de los solidos Totales, Solidos Totales Volátiles, Solidos Suspendidos Totales y Solidos Suspendidos Volátiles, estas ecuaciones se presentan en la Tabla 5.

Tabla 5. Ecuaciones de Regresion linela para solidos totales

Parámetro	Ecuación de Regresión
S. Totales	120.007 + 2.71 tiempo_1 + 0.35 tiempo_2 - 3.07 tiempo_3 + 17.93 voltaje_1+ 16.23 voltaje_2 + 1.76 voltaje_3 - 7.67 voltaje_4 - 28.24 voltaje_5
S. Tot. Volátiles	72.260 + 1.540 tiempo_1 + 0.460 tiempo_2 - 2.000 tiempo_3 + 12.207 voltaje_1 + 9.173 voltaje_2 + 1.507 voltaje_3- 4.893 voltaje_4 - 17.993 voltaje_5
S. Susp. Tot.	123.747 + 3.69 tiempo_1 + 0.07 tiempo_2 - 3.77 tiempo_3 + 15.25 voltaje_1 + 11.25 voltaje_2 + 4.09 voltaje_3 - 7.95 voltaje_4 - 22.65 voltaje_5
S. Susp. volátiles	88.227 + 1.813 tiempo_1 + 0.213 tiempo_2 - 2.027 tiempo_3 + 12.773 voltaje_1 + 8.373 voltaje_2 + 1.840 voltaje_3 - 5.560 voltaje_4 - 17.427 voltaje_5

4.5. Análisis del porcentaje de remoción de solidos del Agua Residual tratada con electroquímica

Para el análisis de remoción de solidos Totales y Solidos Totales Volátiles se presentan una mayor remoción al emplear un voltaje de 80V. Es necesario realizar una mayor experimentación ya que inicialmente estos solidos estas dentro el rango estipulado por las normas mexicanas, por otro lado en los solidos suspendidos totales y solidos suspendidos volátiles se ajusta a los parámetros estipulados por la normas mexicanas al utilizar un voltaje de 50 V. lo antes mencionado se puede visualizar en la Tabla 6.

Tabla 6. Ecuaciones de Regresion linela para solidos totales

PARAMETRO	Voltaje				
	1V	5V	50V	80V	100V
S. Totales	1.23 %	11.72 %	18.56 %	33.47 %	33.47 %
S. Tot. Volátiles	3.59 %	12.67 %	20.24 %	35.75 %	35.75 %
S. Susp. Tot.	2.88 %	8.03 %	16.69 %	27.27 %	27.27 %
S. Susp. Volátiles	4.36 %	10.83 %	18.15 %	29.90 %	29.90 %

5. Conclusiones

Se implementar un proceso electroquímico para la remoción de sólidos y degradación de agentes contaminantes del agua residual urbana de Córdoba Veracruz.

La electrocoagulación es el proceso electroquímico eficaz para tratar aguas residuales urbanas utilizando los electrodos de Aluminio y Fierro.

Se ha determina que a mayor potencial eléctrico aplicado (Voltaje) el agua residual tiene una mayor degradación en las pruebas realizadas y que se obtienen mejores resultados en un menor tiempo.

Determino que entre un potencial eléctrico de 50 V a 80 V es adecuado para implementar para la obteniendo de una buena degradación manteniendo los parámetros permisibles del agua residual bajo las normas oficiales mexicanas.

6. Bibliografía

1. A. K. Darban, A. Shahedi, F. Taghipour, A. Jamshidi-Zanjani. A review on industrial wastewater treatment via electrocoagulation processes Current Opinion in ElectrochemistryIn press, journal pre-proofAvailable online 2020.
2. Alexandre Loukanov, Nouha El Allaoui, Anass Omor, Fatima Zahra Elmadani, Seiichiro Nakabayashi. Large-scale removal of colloidal contaminants from artisanal wastewater by bipolar electrocoagulation with aluminum sacrificial electrodes. Results in Chemistry, 2, 2020, 100038.
3. Amina Tahreen, Mohammed Saedi Jami, Fathilah Ali. Role of electrocoagulation in wastewater treatment: A developmental review. Journal of Water Process Engineering, 37, 2020, 101440.

Modelo Electromagnético para LVRPA en el Proceso Fotocatalítico

Ramos, G,[1] Bolívar, A,[2] Ayala, E.[3]

[1]Universidad Cooperativa de Colombia.

[2]Fundación Unipanamericana.

[3] Fundación Unipanamericana

German.ramos@campusucc.edu.co

nabolivarm@unipanamericana.edu.co

elisabethayala@unipanamericana.edu.co

1. Resumen

Un modelo electromagnético para la determinación de la velocidad de absorción fotónica se desarrolló en función de las características eléctricas y magnéticas del medio[1], considerando factores de fase y atenuación de la suspensión a tratar. Dicho modelo se presenta como una alternativa nueva para los procesos fotocatalíticos y con miras a la escalabilidad del proceso del laboratorio a la industria. Para tal fin se evaluó experimentalmente la permitividad, permeabilidad y conductividad de la suspensión. Se empleó el modelo de seis flujos para simular la absorción fotónica. Se realizaron aproximaciones en relación con la conductividad del medio participante, para poder obtener modelos que permitan establecer el escalado del proceso a nivel industrial.

2. Introducción

En los últimos años se ha producido un creciente interés por el desarrollo de nuevos métodos que conduzcan a la destrucción de determinados contaminantes del agua o del aire. Uno de los procesos que ha recibido mayor atención, es el basado en la acción de la radiación ultravioleta sobre partículas sólidas de un semiconductor (generalmente, dióxido de titanio). La acción combinada de la radiación UV y el fotocatalizador, en presencia de un oxidante (por ejemplo, aire, oxígeno u ozono), permite la transformación de los compuestos orgánicos presentes en el agua contaminada en productos no tóxicos, principalmente agua y dióxido de carbono (mineralización del contaminante).

El rendimiento cuántico se puede determinar cuándo las distribuciones espaciales y direccionales de intensidades de radiación se conocen en la suspensión, resolviendo en parte el problema de la velocidad de reacción. Esta relación es descrita mediante la velocidad de absorción local de fotones (LVRPA) que representa la distribución espacial o disponibilidad fotónica en el

reactor. Las ondas electromagnéticas (fotones) que son las encargadas del proceso de activación del catalizador cuando penetran en el medio, son dispersadas, absorbidas y reflejadas por la suspensión. La descripción de este complejo proceso se realiza mediante un modelo físico matemático, al que se le conoce como ecuación de transferencia radiactiva (ETR).
El objetivo del presente escrito es la determinación de la velocidad de absorción fotónica con miras a la escalabilidad del proceso fotocatalítico a la industria. Para tal fin se realiza un análisis de las formas de afrontar el cálculo de la LVRPA.

2.1 Modelo de dos flujos (TFM)

Cuando un fotón choca con una partícula sólida opaca, puede ser absorbido o dispersado en varias direcciones [2]. Si la partícula es opaca y su superficie una esfera la dispersión es difusa, la probabilidad $\Phi(\varphi)$de ser disperso en una dirección que forma un ángulo de φ con la dirección incidente[3], está dada por Ec. 1

$$\Phi(\varphi)=\frac{8}{3\pi}\left[sen(\varphi)-\varphi cos(\varphi)\right] \quad (1)$$

2.2 Modelo de seis flujos (SFM)

Con el fin de superar las limitaciones observadas en el TFM, fue creado un nuevo modelo, en éste se supone que los fotones serán dispersados en cualquiera de las seis direcciones principales con respecto a la radiación entrante ver Figura 1 y se consideran sus seis flujos [4].

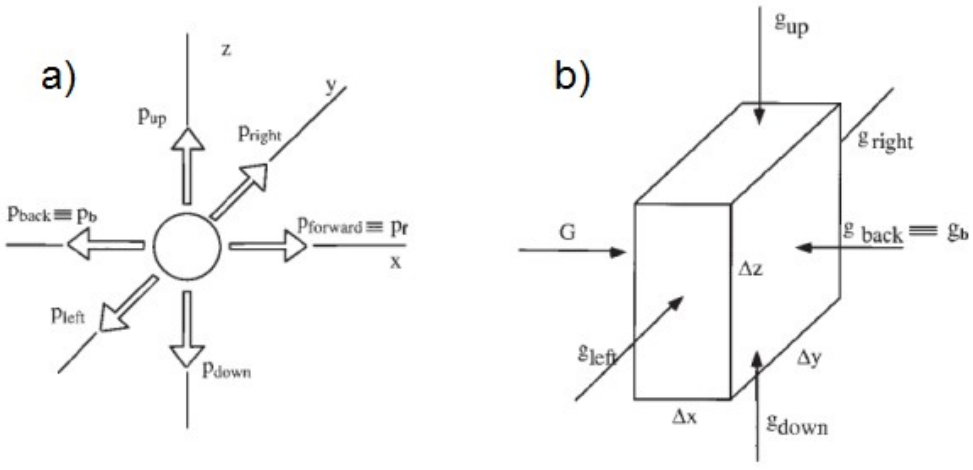


Figura 1. a). Representación de flujos dispersados en las seis direcciones (SFM) respecto a la partícula. b) Modelo diferencial para el balance de energía radiante.[4].

3. Resultados y discusión

3.1 Formulación del modelo de LVRPA

Se utilizó el enfoque de seis flujos SFM para la elaboración del modelo de la LVRPA (Local Volumetric Rate Photonic Absortion) propuesto. Utilizando la teoría electromagnética se presentó una forma de establecer la LVRPA a partir de las características del medio y de la frecuencia de los rayos incidentes sobre el medio participante, los cuales corresponden a los rayos reflejados por la superficie reflectante del colector.

Con el fin de delimitar el estudio, (ver Figura 2), se realizaron las siguientes simplificaciones para llegar al modelo:

1. Sistema de coordenadas cilíndricas, describen de la mejor manera el comportamiento de los rayos reflejados por el colector, sobre el tubo cilíndrico de vidrio por el que discurre la suspensión.
2. La dirección de incidencia de los rayos es radial respecto al sistema de coordenadas cilíndrico propuesto ver Figura 2.
3. Existen n planos con la misma forma de distribución de partículas.
4. Los rayos incidentes serán reflejados con un ángulo θ respecto a la dirección radial.
5. El catalizador absorbe toda la radiación local, debido a esto se hace necesario calcular el factor de atenuación de las ondas electromagnéticas en el medio.
6. No hay emisión por el sistema heterogéneo

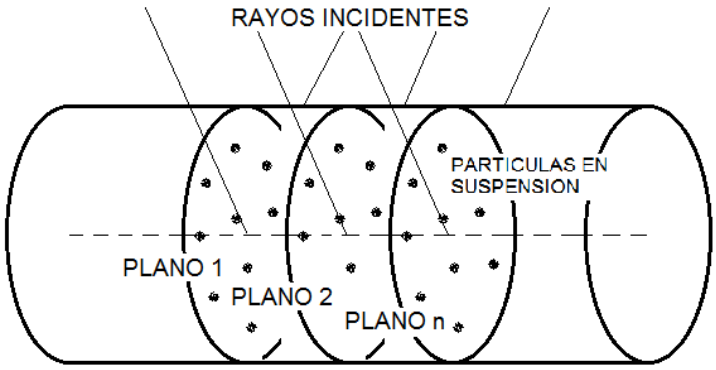


Figura 2. Representación de los planos en el reactor cilíndrico. Rayos incidentes radiales y distribución del TiO_2 en suspensión

El procedimiento para la obtención del modelo se describe a continuación:

1) Elección de los modelos de flujos: El modelo de flujos representa una manera de describir la forma en cómo los fotones interactúan con la suspensión. El flujo de fotones fue modelado suponiendo que los fotones interactuando con el medio, presentaban solamente dos direcciones posibles de dispersión (adelante–atrás). El modelo de seis flujos representa el modelo de dos flujos llevado a tres coordenadas rectangulares de tal manera que existirían seis posibles direcciones de dispersión (seis flujos). Este hecho establece la posibilidad de tener el modelo de seis flujos ya no en coordenadas cartesianas sino en coordenadas cilíndricas.
2) Sustituto de la derivación: Se presentó un desarrollo matemático para establecer el sustituto adecuado a la derivación total (tasa de cambio en una dimensión). Se estableció que el sustituto adecuado para la derivada unidimensional es la divergencia.
3) Modelo propuesto: Los modelos de dos y seis flujos representan aproximaciones de cómo los fotones interactúan con el medio. Se propuso entonces que el flujo de fotones por unidad de área que impactan la partícula debe ser proporcionales a la cantidad de fotones que penetran la suspensión.
4) Solución de la ecuación propuesta: Tomando la divergencia en coordenadas cilíndricas se solucionó la ecuación diferencial parcial utilizando el método de separación de variables de Fourier, donde apareció una constante (dependiente de las condiciones iniciales) y un valor propio (dependiente de las condiciones de frontera), las cuales debieron ser determinadas para la obtención del modelo electromagnético propuesto, que a todas luces representa una nueva forma de afrontar el problema.
5) Determinación de las constantes: Para determinar las constantes se aplicaron los conceptos de factor de atenuación, fase y de propagación, en un medio en donde la densidad o distribución de cargas no es significativa. Los factores de atenuación y fase están relacionados con las constantes.
6) Para delimitar el modelo se realizaron las consideraciones para los cuales, el medio presenta conductividad cero, conductividad pequeña (pero no despreciable) y conductividad alta.

3.2 Modelo propuesto para el cálculo de la LVRPA

Considérese un campo vectorial en R^3, es decir

$$U(x,y,z)=u(x,y,z)\widehat{e_1}+v(x,y,z)\widehat{e_2}+w(x,y,z)\widehat{e_3} \quad (2)$$

En donde los vectores $\left(\widehat{e_1},\widehat{e_2},\widehat{e_3}\right)$ son una base canónica en un sistema de coordenadas curvilíneas ortogonales [5].

Supóngase que U es un campo de fuerza. Supóngase además que Ω es una región acotada de R^3 y adicionalmente la regularidad de la función U de R^3 en R^3 qué define el campo. Esto quiere decir que $U \in C^1\left(R^3\right)$, lo que significa que U y sus derivadas de primer orden son continuas.

Aplicando el teorema de Taylor, se tiene en la Ec. 2 que

$$U\left(\vec{x}+\vec{h}\right)=U\left(\vec{x}\right)+J_{\vec{x}}U\left(\vec{x}\right)\vec{h}+o\left(\left|\vec{h}\right|^2\right)$$

En donde $\vec{x}=(x,y,z)$, $\vec{h}=\left(h_1,h_2,h_3\right)$ y $J_{\vec{x}}U\left(\vec{x}\right)$ es el Jacobiano de U en el punto $\vec{x}$. Si $\vec{h}\to 0$ se puede tomar a $U\left(\vec{x}\right)+J_{\vec{x}}U\left(\vec{x}\right)\vec{h}$ como el valor aproximado de $U\left(\vec{x}+\vec{h}\right)$.

$U\left(\vec{x}\right)$Representa una translación, en tanto que $J_{\vec{x}}U\left(\vec{x}\right)\vec{h}$ se escribe como

$$J_{\vec{x}}U\left(\vec{x}\right)\vec{h}=\begin{pmatrix}u_x & u_y & u_z\\ v_x & v_y & v_z\\ w_x & w_y & w_z\end{pmatrix}\begin{pmatrix}h_1\\ h_2\\ h_3\end{pmatrix}\equiv A\,\vec{h}$$

Considerando la parte simétrica y antisimétrica de A es decir,

$$D=\frac{1}{2}\left(A+A^t\right)\, y\, R=\frac{1}{2}\left(A-A^t\right)$$

El valor aproximado de $U\left(\vec{x}+\vec{h}\right)$ se puede expresar como

$$U\left(\vec{x}\right)=D\vec{h}+R\vec{h}$$

Además

$$D=\begin{pmatrix} u_x & \frac{1}{2}(u_y+v_x) & \frac{1}{2}(u_z+w_x) \\ \frac{1}{2}(u_y+v_x) & v_y & \frac{1}{2}(v_z+w_y) \\ \frac{1}{2}(u_z+w_x) & \frac{1}{2}(v_z+w_y) & w_z \end{pmatrix}$$

Por tanto

$$Traza(D)=\nabla\cdot U$$

Al aplicar un cambio de coordenadas curvilíneas ortogonales se puede cambiar la matriz D en una matriz diagonal $\widetilde{D}$ de la forma

$$\widetilde{D}=\begin{pmatrix} d_1 & 0 & 0 \\ 0 & d_2 & 0 \\ 0 & 0 & d_3 \end{pmatrix}$$

y se tiene que $Traza(D)=\nabla\cdot U$, puesto que la *Traza* es un invariante bajo la transformación de coordenadas curvilíneas ortogonales. Los valores d_i están relacionados con los factores de escala propios de cada sistema de coordenadas.

Así pues, $D\vec{h}$ se interpreta de la siguiente manera. Sea P_o un paralelepípedo y *P(t)* la evolución de P_o en el tiempo *t* es decir, si $\vec{h}(t)=(h_1(t),h_2(t),h_3(t))^t$ son los lados de *P(t)* y $\vec{h}_0=(h_{01},h_{02},h_{03})^t$ los lados de P_o se verifica

$$\begin{cases} \frac{d\vec{h}}{dt}(t) & ¿\, D\vec{h}(t) \\ \vec{h}(0) & ¿\,\vec{h}_0 \end{cases}$$

Los $\tilde{h}_i, i=1,2,3$ los transformados de los h_i factores de escala de la transformación de coordenadas curvilíneas ortogonales.

$$\frac{d\tilde{h}_i(t)}{dt}=d_i\tilde{h}_i(t), i=1,2,3$$

y por tanto,

$$\frac{d}{dt}Vol\left(P(t)\right)=\frac{d}{dt}\left(\tilde{h}_1(t),\tilde{h}_2(t),\tilde{h}_3(t)\right)=\left(\sum_{i=1}^{3}d_i\right)\left(\tilde{h}_1(t),\tilde{h}_2(t),\tilde{h}_3(t)\right)=(\nabla\cdot U)\,Vol\left(P(t)\right)$$

La divergencia mide la tasa de cambio de volumen asociada al campo *U*. Se ha podido establecer finalmente que el sustituto adecuado a la derivada como razón de cambio en R^1, es la divergencia[6].

El flujo de campo es una cantidad escalar que expresa la medida del campo que atraviesa una superficie. Dicho campo puede ser campo de velocidades, campo eléctrico, campo magnético entre otros. El flujo neto de campo es una medida del número neto de líneas de campo que salen de una superficie cerrada.

Bajo el supuesto que el sustituto adecuado en R^2 para la derivada es la divergencia, se puede expresar que la divergencia del campo es proporcional a la magnitud del mismo, es decir, es una extrapolación 3D a lo que comúnmente se conoce como ley de absorción de Lambert en 1D. Bajo esta suposición y las enumeradas en el modelo propuesto, estas hipótesis llevan a la ecuación propuesta.

$$\frac{1}{r}\left\{\frac{\partial}{\partial r}(rI)+\frac{\partial}{\partial\theta}(I)+\frac{\partial}{\partial z}(I)\right\}+kI=0$$

Que tiene por solución, empleando el método de separación de variables de Fourier:

$$I(r,\theta)=I_0 r^{(\lambda-1)}e^{-(kr+\lambda\theta)} \tag{3}$$

Los valores de λ y k corresponden a los valores propios de la Ec.3 relacionada con las condiciones de frontera y las características electromagnéticas de la suspensión respectivamente.

Las leyes de Maxwell son un conjunto de descripciones fisicomatemáticas que representan cualquier fenómeno de carácter eléctrico, magnético o electromagnético de la naturaleza. La identidad vectorial aplicada a las leyes de Maxwell [5] con la que se deducen las expresiones matemáticas, se describe en la Ec. 4.

$$\vec{\nabla}\times\vec{\nabla}\times\vec{A}=\vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}\cdot\vec{A}\right)-\nabla^2\vec{A} \tag{4}$$

Donde $\vec{A}$ es un campo vectorial

Aplicando el rotacional a la ley de Ampere Maxwell, y combinando con Ec.4 se obtiene:

$$\vec{\nabla}\times\vec{\nabla}\times\vec{H}=\vec{\nabla}\left(\vec{\nabla}\cdot\vec{H}\right)-\nabla^2\vec{H}=(\sigma+j\omega\varepsilon)\vec{\nabla}\times\vec{E} \tag{5}$$

Por la ley de Gauss para el campo eléctrico se tiene:

$$-\nabla^2 H = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)H \tag{6}$$

De la misma forma, aplicando el rotacional a la ley de Faraday aplicando la Ec. 4, se obtiene:

$$-\nabla^2 E = -j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon)E \tag{7}$$

definiendo

$$\gamma^2 = j\omega\mu(\sigma + j\omega\varepsilon) \tag{8}$$

las ecuaciones 6 y 7 toman la forma:

$$\nabla^2 E = \gamma^2 E \tag{9}$$

$$\nabla^2 H = \gamma^2 H \tag{10}$$

que se conocen como ecuaciones de ondas electromagnéticas [7].

A γ se conoce como factor de propagación de la onda electromagnética, y de acuerdo con EC. (8) es un número complejo, del cual la parte real, corresponde a α que se conoce como factor de atenuación de la onda electromagnética. La parte imaginaria del número complejo γ es β que se conoce factor de fase, es decir que $\gamma = \alpha + j\beta$.

De la teoría electromagnética, los factores de atenuación y fase se calculan mediante

$$\alpha = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1-\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}-1\right]}$$

$$\beta = \omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1-\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}+1\right]}$$

Aplicando el factor de atenuación y fase al modelo y teniendo en cuentas las consideraciones del modelo, se obtuvo la solución que es el modelo propuesto:

$$I(r,\theta,t) = I_0 e^{-\omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1-\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}-1\right]}\cdot r} e^{-j\left(\omega\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}\left[\sqrt{1-\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)^2}-1\right]}\right)} e^{j\omega t} \tag{13}$$

El medio participante se puede examinar, a nivel electromagnético, mediante el análisis de la conductividad eléctrica, lo cual supone explorar las características electromagnéticas del medio tales como la permeabilidad magnética, permitividad eléctrica, conductividad eléctrica, y frecuencia de la onda electromagnética incidente.

El factor de propagación de una onda electromagnética en cualquier medio, con densidad de carga despreciable, está dado por:

$$\gamma=\left[j\omega\mu\left(\sigma+j\omega\epsilon\right)\right]^{1/2} \tag{14}$$

En un medio sin conductividad, $\sigma=0$ la Ec. 14, toma la forma

$$\gamma=\left[j\omega\mu\left(j\omega\epsilon\right)\right]^{1/2}=j\omega\sqrt{\mu\epsilon}$$

Lo que indica que la onda electromagnética no presenta atenuación y por tanto Ec. 13 toma la forma

$$I=I_0 e^{-j\left(\omega\sqrt{\mu\epsilon}\right)}e^{j\omega t}$$

En un material de conductividad baja $\sigma<\omega\epsilon$, reescribiendo 14

$$\gamma=\sqrt{-\omega^2\mu\epsilon\left[1-j\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right]} \tag{15}$$

O, lo que es lo mismo

$$\gamma=\sqrt{-\omega^2\mu\epsilon\left[1+\frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right]} \tag{16}$$

Realizando una expansión en binomio de Newton

$$\left(a+b\right)^{1/2}=a^{1/2}+\frac{1}{2}a^{-1/2}b-\frac{1}{8}a^{\frac{-3}{2}}b^2+\frac{1}{16}a^{\frac{-5}{2}}b^3+\ldots \tag{17}$$

Aplicándolo en 4

$$\gamma=j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)-\frac{1}{8}\left(\frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)^2+\frac{1}{16}\left(\frac{\sigma}{j\omega\epsilon}\right)^3+\ldots\right] \tag{18}$$

Entonces (19)

$$\gamma=j\omega\sqrt{\mu\epsilon}+\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}\sigma+j\frac{\sqrt{\mu\epsilon}\,\sigma^2}{8\omega\epsilon^2}-\frac{\sqrt{\mu\epsilon}\,\sigma^3}{16\omega\epsilon^3}$$

Así, el factor de propagación tendrá la forma

$$\gamma=\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}\sigma\left[1-\frac{1}{8}\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2\right]+j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[1+\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2\right] \tag{20}$$

Y la Onda electromagnética en el medio, se propagará como

$$I=I_0 e^{-\omega\frac{1}{2}\sqrt{\frac{\mu}{\epsilon}}\sigma\left[1-\frac{1}{8}\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2\right]\cdot r} e^{j\omega\sqrt{\mu\epsilon}\left[1+\left(\frac{\sigma}{\omega\epsilon}\right)^2\right]} e^{j\omega t}$$

Y la onda electromagnética en el medio en el cual la conductividad sea alta se propagará como

$$I=I_0 e^{\pm\omega(r+1)\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\sqrt{\frac{\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)-1}{2}}} e^{\mp j\omega(r+1)\sqrt{\frac{\mu\varepsilon}{2}}\sqrt{\frac{\left(\frac{\sigma}{\omega\varepsilon}\right)+1}{2}}} e^{j\omega t} \tag{21}$$

Estas condiciones son un punto de partida para la posibilidad de escalar el proceso a nivel industrial, para ello basta solamente establecer si el agua requerida sea para regadío, por ejemplo, de esta manera se puede pasar de agua con conductividad cero, a agua con conductividad baja. El proceso en general pasará por etapas que, en relación con las características electromagnéticas y su variación temporal, permitirán establecer tiempos de descontaminación y escalado industrial.

4. Conclusiones

Al presentar este modelo para la absorción de fotones, se realizó un cambio radical de enfoque. Las propiedades eléctricas y magnéticas del fluido, tales como permeabilidad, permitividad y conductividad, asociadas al medio junto con la frecuencia de la radiación UV presentan una alternativa interesante de obtener la LVRPA, a todas luces importante en el moldeamiento de los foto reactores.

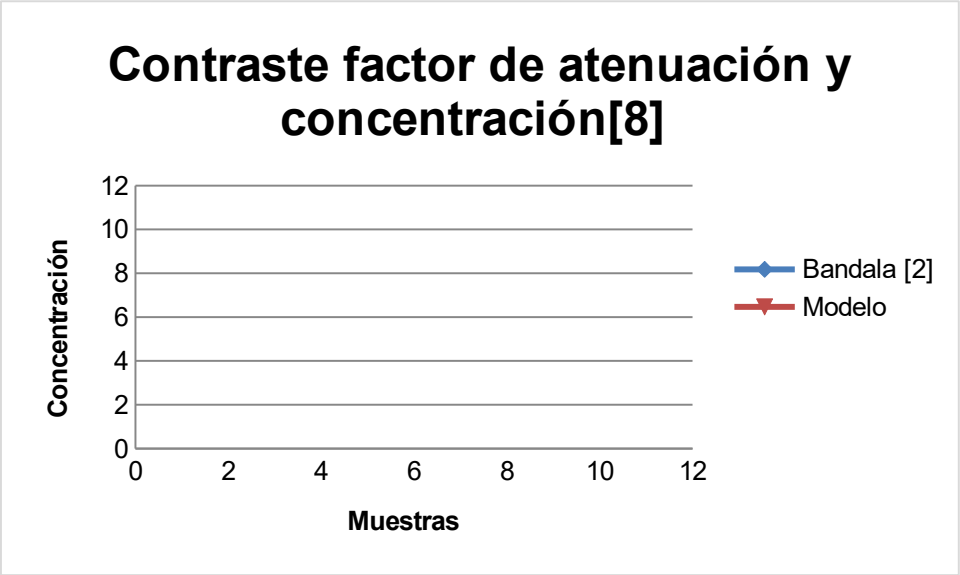


Figura 3. Comparación entre el factor de atenuación y la concentración[8].

Existe una clara relación entre el factor de atenuación de la onda electromagnética con la concentración de ácido oxálico, lo que se ajusta con lo reportado por Bandala et al[8].

El modelo desarrollado se contrastó con los datos reportados[8] ver Figura 3, los que se ajustaron aproximadamente en un 85%, que representa un buen ajuste.

Las características electromagnéticas, claramente se relacionan con las características químicas de la suspensión, para el caso reportado por Bandala[8] las características electromagnéticas se relacionan con la concentración de ácido oxálico. Dicho de otra forma, las características de permeabilidad, conductividad y permitividad reflejan las características químicas de concentración de la solución, es decir, se puede medir la concentración de ácido oxálico o medir las características electromagnéticas para obtener el factor de atenuación del medio.

Se presentó una tendencia evidentemente decreciente en el factor de atenuación obtenido mediante el modelo desarrollado, lo que se ajusta con lo esperado, ya que el medio al acuoso contaminado en su proceso de foto degradación deja de ser “opaco” a la luz solar, motivo por el cual el factor de atenuación decrece.

En la naturaleza de la reacción, las características electromagnéticas cambian en forma permanente debido a los cambios sucesivos del medio contaminado. Con el modelo desarrollado y las restricciones impuestas en relación con la conductividad eléctrica, se puede entonces predecir

los cambios en el medio, conocidos algunos puntos para el factor de atenuación, lo que permite predecir el tiempo necesario para la foto degradación total.

5. Bibliografía

6. Ramos G, Velásquez P., Electromagnetic model for determining the speed of absortive photonic in a solar collector in v (v-collector). Chemical Engineering Transactions. 1609 – 1614 (2017)
7. Brucato A, Rizzuti L. Simplified Modeling of Radiant Fields in Heterogeneous Photoreactors. 1. Case of Zero Reflectance. *Ind. Eng. Chem. Res*, *36,* 4740-4747(1997)
8. Howell J, Siegel R. Termal radiation heat transfer.Washington. National Aeronautics and Space Administration- NASA – 1992.
9. Brucatto. A., Cassano. A., Grisafi. F., Estimating Radiant Fields in Flat Heterogeneous Photoreactors by the Six-Flux Model, *Published online September 15, 2006 in Wiley InterScience (www.interscience.wiley.com).*
10. SpiegeL M. Vector analysis. New York. McGraw Hill. 1959. 250-260 p.
11. Peral A, Ireneo. Primer curso de ecuaciones diferenciales parciales. Madrid. Addison-Weslesy/Universidad Autónoma de Madrid. 1995. 17 p.
12. Edminister J. Electromagnetismo. USA. McGraw Hill. 1992. 181 p.
13. Bandala E., Arancibia-bulnes C, Orozco S., Estrada C., Solar photoreactors comparison based on oxalic acid photocatalytic degradation. Solar Energy 77. 2004. 503–512p

Purificación de ácido benzoico mediante su recristalización

Ramírez D. Janeth[1], Nuño L. Leticia[2], Quintana D. Berenice[3], Contreras L. José L.[4], Hernández G. M. A.[5]

[1]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email: janethrdiaz@gmail.com
[2] Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email lnl@azc.uam.mx
[3]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email mbqd@azc.uam.mx,
[4] Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email jlcl@azc.uam.mx,
[5] Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email mnhg@azc.uam.mx,

1. Resumen

La cristalización es una operación unitaria importante por su amplia aplicación para obtener productos puros de considerable uso comercial y se utiliza en trabajos por lotes para pequeñas producciones y en operación continua para la fabricación de grandes volúmenes, sin embargo,

debido a todas las variables que implica su realización es la más difícil de escalar. En el presente trabajo se investigaron las condiciones de operación que nos permitieran obtener cristales de ácido benzoico buscando reducir a un mínimo el tiempo necesario para la cristalización. El equipo utilizado es un cristalizador donde la sobresaturación se obtiene aplicando evaporación y posteriormente enfriamiento. La principal variable a considerar fue el disolvente. El mejor resultado se obtuvo con una mezcla de etanol-agua al 60 en volumen. Otro factor importante es la concentración inicial de la solución donde a mayor concentración se tuvo también mayor rendimiento. El tiempo mínimo fue de tres horas.

2. Introducción

La cristalización es un proceso donde se forman partículas sólidas, cristales, a partir de una fase líquida homogénea. Un cristal es el tipo de materia no viva más altamente organizada. Están constituidos por redes espaciales cuyos componentes pueden ser átomos, iones o moléculas dispuestos en formaciones ordenadas de forma tridimensional como poliedros de vértices agudos y caras planas. Los ángulos formados por estas caras correspondientes a un determinado material son iguales y específicas de dicho material de tal forma que son la base para la clasificación de los cristales. [1]

2.1 Solubilidad, saturación, sobresaturación y antisolvente

Comprender los conceptos de solubilidad, saturación y sobresaturación es importante para entender el fenómeno de la cristalización. La solubilidad es una propiedad física de un sólido que nos dice la cantidad máxima de este sólido que se puede disolver en una porción determinada del líquido en estado de equilibrio, en estas condiciones se dice que la solución se encuentra saturada. [2] Los datos de solubilidad se dan, por lo general, como porcentaje en peso del material anhidro respecto a la disolución, en otros casos como porcentaje en peso del material anhidro respecto al disolvente total. [3] La solubilidad varía con la temperatura, en general, cuando la temperatura aumenta, la solubilidad aumenta también por lo que cuando se enfría una solución saturada parte del soluto debe salir de ella para que la solución enfriada regrese al equilibrio y este soluto sale en forma de cristales sólidos. Sin embargo, la velocidad de cristalización puede ser lenta, por lo que puede existir una condición meta-estable donde la concentración del soluto es mayor que el valor de solubilidad a la temperatura más baja, en estas condiciones se dice que la solución está sobresaturada, y la diferencia entre la concentración real y la del equilibrio se llama sobresaturación. [2]

Las relaciones de equilibrio para los sistemas de cristalización se expresan mediante datos de solubilidad que se representan en diagramas de fase o curvas de solubilidad, sin embargo, existe dificultad para reproducir estos datos, es necesario que el sistema se encuentre en las mismas condiciones de pH, temperatura y composición y que alcance el equilibrio durante un período de tiempo que puede variar entre 1 y 100 horas. [3] En algunos casos para alcanzar la sobresaturación se añade a la solución saturada un segundo disolvente miscible con el primero y en el cual la

solubilidad del soluto sea menor, al reducir la solubilidad se induce a la sobresaturación, a este segundo disolvente se le llama antisolvente o cosolvente. [4]

2.2. *Polimorfismo*

El polimorfismo es un fenómeno que ha propiciado un acelerado desarrollo de los procesos de cristalización sobre todo en la industria farmacéutica. El ejemplo más conocido y trágico de este fenómeno es la talidomida que fue comercializada como un medicamento contra las náuseas en su forma R-(+)-talidomida, la forma S-(-)-talidomida es un agente teratogénico que causa malformaciones y muerte en infantes cuando es consumida por mujeres en gestación. Aunque existen otros casos este es el más conocido. El polimorfismo también afecta a los productos de la cristalización en aspectos como reducción de la solubilidad, disminución de la velocidad de disolución, incremento de la dureza de la tableta, disminuyendo la capacidad de la biodisponibilidad, por lo que mantener la estabilidad del producto cristalino se ha vuelto un factor de primera importancia y la tecnología de la cristalización se ha convertido en el elemento clave para la resolución de este problema.

2.2 Nucleación y crecimiento

La nucleación es el primer paso en la formación de una fase sólida, se presenta cuando las moléculas o iones de un soluto en una solución sobresaturada se agrupan dando lugar a una partícula de unos pocos nanómetros de tamaño. El siguiente paso consiste en su crecimiento hasta dar lugar a un cristal no obstante entre uno y otro paso importantes procesos secundarios tienen lugar. Algunas partículas pueden romperse dando lugar a un gran número de pequeños fragmentos, [4] esta situación es un factor muy importante en la nucleación ya que la diferencia termodinámica entre las partículas o cristales pequeños y los grandes radica en que los pequeños tienen una cantidad significativa de energía superficial por unidad de masa, mientras que los grandes no la tienen, por lo tanto, la solubilidad de un cristal pequeño es mayor mientras más pequeño es. De este modo una solución sobresaturada puede encontrarse en equilibrio con cristales diminutos, pero si existen cristales grandes, estos crecerán mientras que los de menor tamaño se disolverán. Esto es lo que se llama efecto de tamaño de partícula. Los datos de solubilidad común se aplican a cristales relativamente grandes. [5]

El crecimiento del cristal es un proceso de difusión e integración modificado por el efecto de la superficie sólida en la que se presenta. Las moléculas o iones del soluto alcanzan las caras de crecimiento de un cristal por difusión a través de la fase líquida. Una vez en la superficie deberán acomodarse en la red espacial a través de una capa de adsorción. Se tienen variaciones en la forma de los cristales cuando sus caras individuales crecen a diferente velocidad. La forma que el cristal toma dependiendo de las proporciones de sus caras, se le llama hábito del cristal. De este modo el crecimiento de los cristales se puede simplificar en dos pasos:

a) La transferencia de masa del soluto de la solución a la superficie de los cristales por difusión, convección o una combinación de ambos mecanismos.
b) La incorporación del soluto en la red espacial a través de la superficie de adsorción. [4]

2.3 La cristalización como operación unitaria

El hecho de que un cristal sólido bien formado es casi puro hace que la cristalización como operación unitaria sea uno de los procedimientos más utilizados para la separación y purificación de productos. Resulta un método práctico para la obtención de sustancias puras de amplio uso comercial en presentaciones adecuadas para su envasado y almacenamiento. En los últimos años los procesos de cristalización han mejorado significativamente fabricando productos de alto valor comercial y desarrollando procesos de manufactura más eficientes [8].

Es importante también que los cristales tengan tamaños uniformes y que no formen aglomeraciones sobre todo cuando se trata productos de venta directa al público. Cuando la solución sobresaturada presenta la formación de cristales tenemos presentes dos fases, a la fase líquida se le llama licor madre y a la mezcla de ambas fases se le denomina magma

El equipo utilizado a nivel industrial se clasifica principalmente por: a) su forma de operar, b) la forma de alcanzar la sobresaturación.

Por la forma de operar se puede trabajar en forma continua o por lotes. Comercialmente es preferible la forma continua sobre todo cuando se trata de altos volúmenes de producción, la producción por lotes se utiliza para aplicaciones especiales y más comúnmente en la industria farmacéutica. Para alcanzar la sobresaturación se consideran tres procedimientos: 1) por enfriamiento sin evaporación o con mínima evaporación, para solutos cuya curva de solubilidad es muy pronunciada; 2) por evaporación, para solutos cuya solubilidad es poco dependiente de la temperatura o cuando disminuye al aumentar la temperatura; 3) por una combinación de ambos métodos.

Otra clasificación de los diferentes cristalizadores empleados se basa en el método empleado para mantener en suspensión los cristales en crecimiento, esto se puede lograr mediante agitación mecánica, o bien la solución se hace circular a través de un intercambiador de calor con o sin raspadores de superficie. La forma de mantener el líquido sobresaturado en contacto con los cristales también cambia dependiendo del tipo de cristalizador. En los equipos donde se utiliza el método de circulación de magma, como su nombre lo dice, toda la mezcla en su conjunto pasa por las etapas de sobresaturación y cristalización. Existe otro método llamado de circulación del líquido, donde una parte de la corriente de líquido sobresaturado se hace pasar a través de un lecho fluidizado donde crecen los cristales y se forman nuevos núcleos. Después, el líquido saturado se pasa a evaporación o enfriamiento para volver a la condición de sobresaturación y entonces se recircula. [5] Los cristalizadores industriales, emplean diferentes formas de agitación, pueden consistir en agitadores mecánicos con o sin placas deflectoras, en el caso de los métodos de circulación se utilizan bombas externas. [1]

La selección de un tipo específico de cristalización depende principalmente de las características del compuesto a cristalizar, por ejemplo el cloruro de sodio se obtiene principalmente por evaporación únicamente debido a sus valores limitados de solubilidad con respecto a la temperatura, en contraste muchos compuestos, sobre todo de aplicación farmacéutica requieren de cristalización por enfriamiento, o una combinación de cristalización por enfriamiento y adición de antisolvente debido a sus valores de solubilidad en relación con la temperatura. Durante la operación también es posible utilizar diferentes estrategias para optimizar el proceso, tales como siembra de cristales, remoción de finos, uso de velocidades de enfriamiento o evaporación óptimos, relaciones adecuadas de compuesto/ antisolvente añadido.

Existen muchos factores a controlar dentro de los procesos de cristalización como la distribución del tamaño de partícula, la transición polimorfa, pureza y morfología del cristal, densidad, fluidez, compactibilidad, solubilidad y velocidad de disolución. El desarrollo de modelos de sistemas de cristalización ha proporcionado un mejor entendimiento de los efectos de las principales variables de estos procesos, tales como la aglomeración, el rompimiento, el engrase o la transición polimorfa. Entre las estrategias de control para los procesos de cristalización se encuentra la del llamado “modelo libre”, que consiste en una retroalimentación de los resultados obtenidos en una experimentación y contrastarlos con los valores de las variables establecidos previamente. Variables tales como concentración, temperatura, relación concentración/sobresaturación o sus combinaciones pueden utilizarse para establecer condiciones óptimas de un proceso de cristalización [9]. Aunque este método se ve afectado por inconsistencias del sistema resulta muy útil sobre todo si no se cuenta con tecnologías analíticas que permitan monitoreos en tiempo real.

2.Ácido benzoico y sus aplicaciones

El ácido benzoico, C_6H_5COOH, es un compuesto sólido de cristales livianos, blancos y filiformes, los cuales desprenden un aroma almendrado. Tiene varias acciones medicinales, usándose como componente de productos farmacéuticos: empleado como un reactivo para concentrar drogas y como lubricante de pastillas, para hacer comprimidos y píldoras más fáciles de deglutir. También se emplea como descongestionante, inhalante, expectorante y analgésico. El ácido benzoico es un conservante alimenticio ampliamente utilizado en el mundo por su capacidad de controlar bacterias, levaduras y mohos, se emplea tanto como ácido o forma de alguna de sus sales. La solubilidad del ácido benzoico es de 3.4 a 20°C y de 70 a 95°C. Los conservadores derivados del ácido benzoico son: el ácido benzoico E-210, benzoato de sodio E-211, benzoato de potasio E-212, benzoato de calcio E-213. El nombre “E” es un código de identificación que se le asigna a los aditivos que ya han sido evaluados por un Comité Científico y que han sido aceptados y se consideran seguros por la Unión Europea. Los aditivos con número E entran a formar parte de unas listas de legislación para establecer las cantidades máximas y el tipo de aditivo a utilizar dependiendo la legislación de cada país. [6]

3. Condiciones experimentales

Para separar los cristales de ácido benzoico de sus impurezas se procede a disolverlos en un solvente o mezcla de disolventes calientes, posteriormente se procede a enfriar y el sólido se separa como precipitado cristalino. Es importante seleccionar un disolvente adecuado que no reaccione con el soluto. El sólido impuro se disuelve en el disolvente caliente por lo que debe disolver al producto a purificar a una alta temperatura y debe de disolver los contaminantes a bajas temperatura. Se filtran las impurezas e inmediatamente se comienza la cristalización del sólido, se recolectan los cristales por filtración en frio, para evitar que los cristales se redisuelvan, el disolvente debe de tener un punto de ebullición relativamente bajo para facilitar el secado de los cristales húmedos. Se determina el rendimiento del sólido obtenido. Para que las impurezas sean eliminadas totalmente se necesita que estas sean totalmente insolubles en el disolvente caliente o que sean totalmente solubles en el disolvente frio [7].

3.1 Selección del disolvente

Las pruebas para determinar si un disolvente es adecuado se realizan en tubos de ensayo utilizando entre 10-20 miligramos de muestra, se agrega gota a gota el disolvente que se considere apropiado, en todo momento se debe de agitar y calentar la disolución. Se puede obtener los siguientes casos: Si el soluto se disuelve a temperatura ambiente el disolvente elegido no servirá para la cristalización. Si el soluto no se disuelve después de agregar 1.5 ml a 2 ml de disolvente se dice que el soluto es poco soluble. Si se disuelve totalmente en caliente dejar que se enfríe el

tubo y se comprueba la aparición de los cristales, si la precipitación es masiva se ha encontrado el disolvente correcto.

3.2 Filtración en caliente

Para la eliminación de impurezas insolubles se hace una filtración a vacío en caliente con embudos Buchner, adaptados a kitasatos. Este tipo de filtración tiene algunas complicaciones, existen algunos disolventes que podrían evaporarse por el efecto de la succión modificando la proporción de disolventes en la mezcla, generando la formación de cristales como consecuencia reduciría el rendimiento de la cristalización. La filtración también se puede realizar por gravedad. En ambos casos, antes de filtrar, se debe de calentar el embudo, se moja el embudo en el disolvente caliente, para lograr adherencia sobre el embudo. Una vez que se filtró la solución se lava el recipiente original con el disolvente caliente, si se forman cristales debido a las paredes frías del kitasato se debe de calentar la solución para disolver los cristales, se pasa la solución a un matraz Erlenmeyer para su cristalización definitiva.

3.3 Cristalización del solido

Enfriar la solución a una velocidad moderada para así obtener cristales medianos y al mismo tiempo raspar las paredes de matraz Erlenmeyer con una varilla de punta, si se enfría la solución rápidamente se formarán cristales muy pequeños. Si el sólido no cristaliza se puede inducir la cristalización raspando por más tiempo las paredes del matraz Erlenmeyer por abajo del nivel de la solución, agregar una siembra, enfriar a menor temperatura con un baño de hielo.

3.4 Filtración en frio

Una vez que se haya producido la cristalización en frio, se separan los cristales mediante filtración al vacío. Se debe emplear el embudo Buchner tal como se mencionó en la filtración en caliente, Si algunos cristales quedan en el matraz Erlenmeyer, se puede usar parte del líquido filtrado también llamado líquido madre al matraz Erlenmeyer para poder desprender los cristales y de nuevo filtrar.

3.5 Lavado y secado de los cristales

Los cristales deben de ser lavados con el objeto de eliminar los líquidos madre que los impregna, si no se lavan al momento de secar los cristales depositaran sobre la superficie de los cristales las impurezas que llevan disueltas. El disolvente que se emplea para el lavado de los cristales es mismo empleado para la recristalización y debe usarse la menor cantidad posible para evitar pérdidas por disolución. Se debe de interrumpir la succión cuando se lavan los cristales es importante humedecer los cristales que se encuentran en el embudo con el solvente frio. Los cristales obtenidos por recristalización tienen disolvente adsorbido. El secado de sólidos se

puede realizar en una estufa a temperaturas mayores a la temperatura ambiente o secarse al aire, en lugar cálido y protegidos del polvo del ambiente o se puede usar un desecador con conexión al vacío.

3.6 Determinación del rendimiento

3.6.1 Cálculo experimental

Una vez realizado el proceso de recristalización, es importante calcular el rendimiento, es decir, la recuperación de masa respecto de la masa inicial sometida al proceso de recristalización.

$$Rendimiento\,\% = \frac{masa\ final\ obtenida}{masa\ inicial} \times 100 \quad \textbf{(1)}$$

3.6.2 Calculo teórico

Si la muestra es conocida y se cuenta con los datos de solubilidad en frio y en caliente, se podrá calcular que cantidad exacta de solvente se requerirá para la disolución total en caliente, y que masa de muestra precipitara al enfriar (será la masa final que se recupere).

1. Mínima cantidad de solvente para recristalizar

$$V = \frac{m_i}{Sc_i} \quad \textbf{(2)}$$

2. Masa solubilizada al enfriar

$$masa_{sf} = V \times S_f \quad \textbf{(3)}$$

3. Calculo del rendimiento, suponiendo que no hubo pérdidas experimentales

$$Rendimiento\,\% = \left(1 - \frac{masa_i \times masa_{s.f}}{masa_{\square}}\right) \times 100 \quad \textbf{(4)}$$

Donde:

V = $Volumen S_f$ = $Solubilidad\ en\ frio$

S_c = $Solubilidad\ en\ caliente$

$masa_i$ = $masa\ inicial$

$masa_{s.f}$ = $masa$ de soluto en $el\ volumen\ V$, $al\ enfriar$

3.7 Cristalización en el equipo de evaporación - cristalización

Con base en los resultados de las pruebas de solubilidad del laboratorio, se establecen las temperaturas y concentraciones de las disoluciones para trabajar en el equipo de evaporación- cristalización. Figura 1. La disolución de concentración conocida se coloca en el tanque de almacenamiento F-110 de donde es bombeada por medio de la bomba dosificadora L-111 al evaporador E-210 donde se lleva a cabo el calentamiento mediante una mantilla eléctrica. La capacidad máxima del recipiente es de cinco litros, la cantidad mínima recomendable de alimentación es de tres litros de disolución.

El vapor generado se condensa en D-310. La corriente de agua fría que se usa como refrigerante es tomada del sistema hidroneumático L-711, una vez que ha pasado por el proceso es enviada a la torre de enfriamiento P-710 para su recirculación. El condensado que se obtiene se almacena en el tanque E-410. El líquido concentrado se descarga a cristalizador X-510, este cristalizador tiene un enchaquetado que se puede utilizar para calentar o enfriar según se utilice el sistema de calefacción/refrigeración P-610. En este caso se utilizó el sistema de enfriamiento para obtener la sobresaturación.

El magma (solución saturada, también llamada licor madre, y cristales) se descargan por la válvula K-512. En la Tabla 1 se describen los componentes del equipo

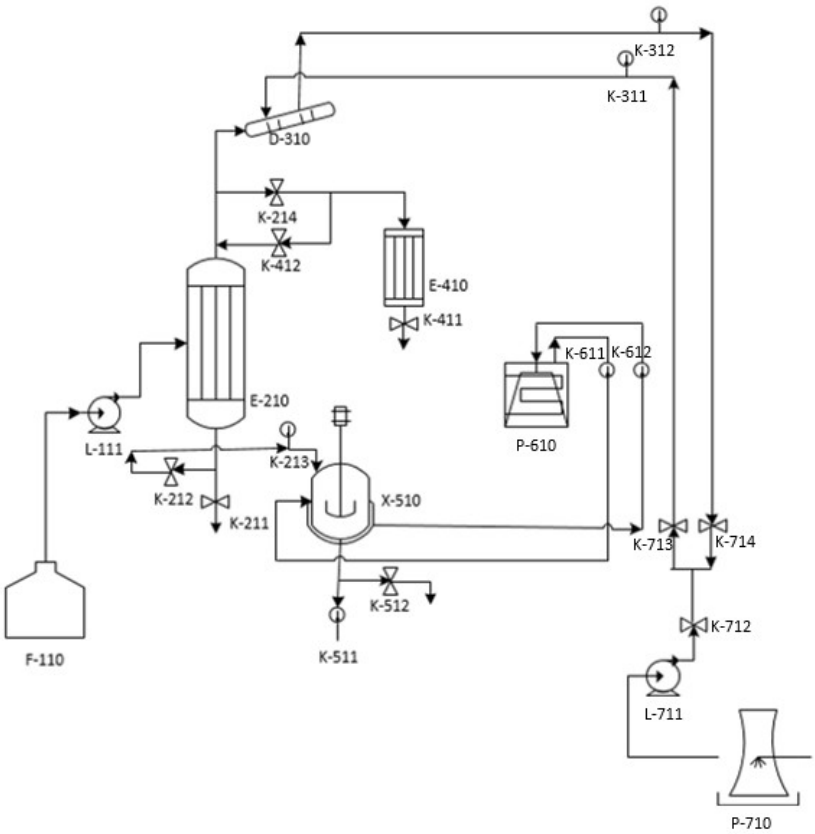


Figura 1 Diagrama de flujo del equipo de cristalización

Tabla 1. Componentes del evaporador – cristalizador

Equipo	Simbologia
Tanque de almacenamiento	F-110
Evaporador	E-210
Tubo refrigerante	D-310
Tanque de almacenamiento del condensado	E-410
Cristalizador	X-510
Sistema de calefacción/refrigeración	P-610
Torre de enfriamiento	P-710
Bomba dosificadora	L-111
Hidroneumático	L-711

Válvulas	K-211,K-212,K-214,K-411,K-412, K-512, K-712,K-713,K-714
Termopares	K-213, K-311,K-312, K-511,K-611,K-612

4. Resultados y discusión

El trabajo en el laboratorio para determinar las curvas de solubilidad incluyó diferentes disolventes: agua, metanol, alcohol isopropílico y acetona. Cuando se hace la prueba con acetona inmediatamente que se agrega el ácido, comienza a descender la temperatura y con solo una agitación tenemos formación de cristales en las paredes del recipiente, al ser un disolvente con muy bajo punto de ebullición ocasiona que la cristalización resulte muy difícil de controlar. La curva de solubilidad más conveniente mostró ser la mezcla de etanol-agua al 20 % la cual se muestra en la Figura 2.

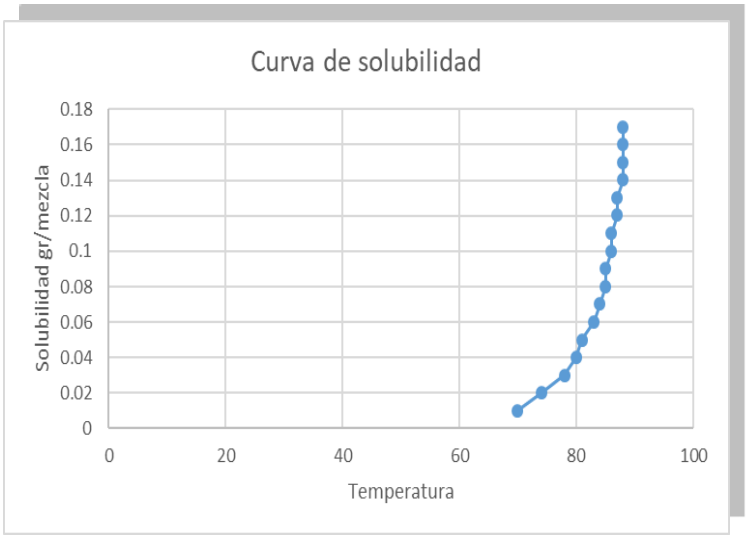


Figura 2. Curva de solubilidad del ácido benzoico en una mezcla de etanol-agua al 20 %



Figura 3. Cristales de ácido benzoico.

En esta curva se aprecia el comportamiento que debe tener un compuesto cuando se pretende purificarlo por medio de cristalización: debe mostrar una marcada diferencia en su solubilidad la cual debe ser significativamente mayor a alta temperatura que a baja temperatura.

Las pruebas en el equipo se iniciaron utilizando como disolvente agua destilada y posteriormente se hicieron pruebas con mezclas de alcohol- agua. Los resultados más relevantes se muestran en la Tabla 2. En la figura 3. Se puede observar el licor madre con los cristales formados.

En todos los casos se prepararon tres litros de disolución y para obtener la sobresaturación se evaporó un litro de disolvente excepto en la prueba 2 donde se evaporaron 1.5 litros.

La evaporación donde se empleó como disolvente sólo agua resultó demasiado lenta, siendo uno de los factores que más influyeron en el tiempo del proceso. Las pruebas 1 a 5 se hicieron con cristales de ácido benzoico que, debido a su tiempo y condiciones de almacenamiento, se pueden considerar impuros. En la prueba 6 se emplearon cristales de reciente adquisición que se pueden considerar puros para hacer una comparación del proceso con cristales “puros e impuros”. Comparamos la temperatura de 38°C que se requirió para disolver 40 gr con 32 °C que fueron necesarios para disolver aproximadamente la mitad.

En las pruebas iniciales se utilizaron cristales “impuros” de mayor tamaño, necesitando mayor temperatura y tiempo para su disolución.

Tabla 2. Resultados más relevantes de las pruebas de cristalización

Prueba		**T. de dilución**	**Composición del disolvente %**		**Tiempo de evaporación**	**T descarga magma**	**Cristales obtenidos**	**R.**	**Tiempo del proceso***
	gr	**°C**	**Etanol**	**Agua**	**min**	**°C**	**gr**	**%**	**hr**
1	10.2525	77	-	100	123	14.7	0.6895	6.725	6.15´
2	5.0004	72	-	100	128	16	0.3321	6.642	7.30´
3	10.0045	57	20	80	120	28.3	1.3466	13.46	5.10´
4	10.0004	47	40	60	56	32	1.3466	13.47	3.20´
5	20.3624	32	60	40	34	31.1	14.9988	73.69	3.5´
6**	40.005	38	60	40	38	27.9	31.5291	78.81	3
			Isopropilico	**Agua**					
7	20.4078	30	60	40	17	20.6	10.616	52.02	3.10´

* Tiempo sin considerar la filtración del magma descargado del equipo

** Ácido benzoico puro

5. Conclusiones

El mejor disolvente resultó la mezcla de etanol 60 % y 40 % agua en volumen, actuando en este caso el agua como un antisolvente.

La mayor cantidad de etanol contribuyó también a acortar el tiempo del proceso siendo mucho más rápida su evaporación.

Hay poca diferencia entre los resultados de tiempo y rendimiento para una solución inicial con 20.3624 gr. de cristales “impuros”, prueba 5 y la prueba 6 con el doble de cristales “puros”.

Se logró disminuir el tiempo del proceso de cristalización de siete horas y media a tres horas.

6. Bibliografía

14. McCabe W., Smith, C., & Harriot, P. (2007). *Operaciones unitarias en ingeniería química*. México: McGraw-Hill Interamericana.
15. Felder Richard M., Rousseau Ronald W.. (2006). *Principios elementales de los procesos químicos.* México: Limusa Wiley.
16. Robert, H. P. Green, D. W. (2012). *Manual del ingeniero químico*. Aravaca (Madrid): McGraw Hill Interamericana de España, S.A.U..
17. Jones, A.G. (2002). *Crystallization Process Systems*. Great Britain: Butterworth-Heinemann.
18. Geankoplis, C. J. (2006). *Procesos de transporte y principios de procesos de procesos de separación.* MÉXICO: CECSA.
19. Dejiang, Z., Shijie, X., Shichao, D., Jingkang, W., & Junbo, G. (2017) Progress of pharmaceutical continuous crystallization. Pág.354-363.
20. Edward L. Paul, Hsien-Hsin Tung, Michael Midler. (2004). Organic crystallization processes. Pág. 133-143.
21. Zhenguo Gao, Sohrab Rohani, Junbo Gong, Jingkang Wang. (2017). Recent developments in the crystallization process: toward the pharmaceutical industry. Pag. 343-353.
22. Nagy ZK, Chew JW, Fujiwara M. Braatz RD. (2008) Comparative performance of concentration and temperature controlled batch crystallizations. J Process Contr; 18 (3-4) Pag. 399-407

Almost sure exponential robust stability for the Euler-Maruyama scheme in a stochastic controlled Schrödinger equation

Romero-Meléndez, C.[1], Castillo-Fernández, D.[1]

[1] Department of Basic Sciences. Autonomous Metropolitan University. Mexico.

cutberto@azc.uam.mx, david_castillo_2004@yahoo.com.mx

1. Abstract

We study the stability of zero solution of a stochastic quantum two-level system, with two new definitions of almost sure exponential robust stability and asymptotical stability for the Euler-Maruyama numerical scheme, in the stochastic controlled Schrödinger equation. We apply, by extending to case of diffusion term is controlled, the techniques used by Mao and Tsoi, to prove the almost sure exponential robust stability and asymptotic stability for Euler-Maruyama scheme. We illustrate these results in a Nuclear Magnetic Resonance (NMR) problem.

2. Introduction

The stability and robustness analysis of numerical computations in the stochastic controlled Schrödinger equation is motivated, at first, by the insensitivity of the numerical solution found, via Euler-Maruyama numerical scheme, with respect to the ensemble of parameters related with the Nuclear Magnetic Resonance (NMR) phenomenon. Secondly, in the choice of the optimal control to steer, with probability one, two quantum states for a stochastic quantum system, minimizing the cost, we require some asymptotic stability properties and it is important to have several stability results that allow achieving the desired task. We can use stability results to select controls, assuring asymptotic stability desired properties. Studying the stability of the numerical schemes for stochastic controlled Schrödinger equations and computing approximations, it's important to analyze the choice of step size t_k, in order to extend the stability properties to the exact solution of the corresponding stochastic controlled Schrödinger equation, by very large time. There are different types of exponential stochastic stability and we look for the most suitable four our optimal control problem.

Our definitions of almost sure exponential robust stability and asymptotic stability are variants in the control case, of Mao X. definitions for the stability of numerical schemes. We begin with the Schrödinger equation depending on time

$$\frac{d}{dt}\psi(t)=-iH(u(t))\psi(t),(1)$$

where $\psi=(\psi_1,\psi_2):[0,T]C^2$ is a quantum state, $u:[0,T]\to R^2$, $u(t)=(u_1(t),u_2(t))$ are stochastic controls and the energy of the system is represented by the Hamiltonian operator $H(t)$. This Hamiltonian contains deterministic and stochastic interactions so, we can separate them as

$$H(t)=H_0(t)+H_1(t)$$

where $H_0(t)$ is the free system Hamiltonian and the random Hamiltonian $H_1(t)$ of the system under the influence of one stochastic perturbation, so we can write

$$H(t)=\widetilde{S}_3+(\widetilde{S}¿¿2u_2(t)+\widetilde{S}_1u_1(t))\xi(t),¿$$

where $\widetilde{S}_i$ is the real representation of the Pauli matrix, for $i=1,2,3$ and $\xi(t)$ can be represented as a Brownian motion process or a Wiener process $W(t)$, by $dW(t)=\xi(t)dt$.

$W(t)$ is a standard Wiener real process, defined over a probabilistic real valued space $(\Omega,B,\{B_t\},P)$ and $\{B_t\}_{t>0}$ is a sub-σ-algebra defined by the usual conditions. Therefore, the stochastic linear Schrödinger equation for pure states, corresponding to equation (1) is:

$$d\psi(t)=\widetilde{S}_3\psi(t)dt+(\widetilde{S}¿¿2u_2(t)+\widetilde{S}_1u_1(t))\psi(t)dW,¿$$

By splitting real and imaginary parts of ψ, ψ_R, ψ_I, respectively and by considering

$$x(t):=(\psi_{1R}(t),\psi_{2R}(t),\psi_{1I}(t),\psi_{2I}(t))^t,S_3=\begin{pmatrix}\Re\widetilde{S}_3 & Im\widetilde{S}_3\\ -Im\widetilde{S}_3 & \Re\widetilde{S}_3\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}0&0&-1&0\\0&0&0&1\\1&0&0&0\\0&-1&0&0\end{pmatrix}$$

$$S_2=\begin{pmatrix}0&-1&0&0\\1&0&0&0\\0&0&0&-1\\0&0&1&0\end{pmatrix},S_1=\begin{pmatrix}0&0&0&-1\\0&0&-1&0\\0&1&0&0\\1&0&0&0\end{pmatrix}$$

we obtain the following equivalent extended stochastic differential system

$$d\begin{pmatrix}x_1(t)\\x_2(t)\\x_3(t)\\x_4(t)\end{pmatrix}=\begin{pmatrix}-x_3(t)\\x_4(t)\\x_1(t)\\-x_2(t)\end{pmatrix}dt+\begin{pmatrix}-u_2(t)x_2(t)-u_1(t)x_4(t)\\u_2(t)x_1(t)-u_1(t)x_3(t)\\u_1(t)x_2(t)-u_2(t)x_4(t)\\u_1(t)x_1(t)+u_2(t)x_3(t)\end{pmatrix}dW(2)$$

that is to say, written in integral form:

$$x(t)=x_0+\int_0^t S_3x(s)ds+\int_0^t (S¿¿2u_2(s)+S_1u_1(s))x(s)dW(s),0\le t\le T¿$$

In [1], we use the Euler-Maruyama method to find a numerical solution of (2).

2.1 Euler-Maruyama method

In the context of the optimal control, equation (2) represents a stochastic controlled coupled differential system whose analytic solution cannot be found, so a numerical solution is needed. The Euler-Maruyama method is the simplest numerical method for solving stochastic differential equations. Let $\|\ \|$ be the Euclidean norm in R^n and let's consider the trace as the norm in R^{nm}.

The Euler-Maruyama method is obtained by truncating the Itô's formula of the stochastic Taylor series after the first terms. Denoting $x_k=x(t_k)$, this method computes discrete- approximations $x_{k+1}x_k(kt)$, selecting a grid of [0, T] : $0<t_0<\ldots<t_N=T$ and satisfying the following stochastic difference equation:

$$x_{k+1}=x_k+S_3x_kt_{k+1}+(S_1u_1(t)+S_2u_2(t))x_kW_{k+1}(3)$$

where

$$t_{k+1}=t_{k+1}-t_k$$

$$W_{k+1}=W(t¿¿k+1)-W(t¿¿k)¿¿$$

So, we have:

$$x(t_{k+1})=x(t_k)+\int_{t_k}^{t_{k+1}} S_3 x(s)\,ds+\int_{t_k}^{t_{k+1}} (S¿¿2\,u_2(s)+S_1 u_1(s))x(s)dW(s),¿$$

Each one of these integrals approximate the corresponding integrals of equation (2). In this process, we are interested in the zero solution or equilibrium position of equation (2), by using the corresponding Euler-Maruyama numerical scheme (3).

3. Almost sure exponential robust stability and asymptotic stability

We will introduce the definitions of almost sure exponential robust stability and asymptotic stability of the trivial solution of the numerical scheme (3), associated to the stochastic controlled Schrödinger equation (2).

First of all, in order to addressing the concepts of stochastic stability and to adapt the classical Lyapunov theory, we introduce a Lyapunov function $V(t,x)C^{1,2}¿$, with $C^{1,2}¿$, the family of all nonnegative functions $V(t,x)$ defined on $R^{+¿\times R^n¿}$, such that they are continuously twice differentiable in x and once in t, which allows to guarantee the stability of the solution of the general stochastic differential equation

$$dx(t)=b(t,x(t),u(t))dt+\sigma(t,x(t),u(t))dW(4)$$

where $b:R^{+¿\times R^4\times R^2 R^4¿}$, $\sigma:R^{+¿\times R^4\times R^2 R^{4\times 4}¿}$ and $W(t)$ is a 1-dimensional Brownian motion.

The function $V(t,x)$ must satisfy, according to Itô's formula, the expression:

$$dV(t,x)=LV(t,x)\,dt+V_x(t,x)\sigma(t,x)\,dW(t) \quad (5)$$

where $L:R^{+¿\times R^4¿}\ R$ is the diffusion operator acting on $V(t,x)$ and defined by

$$L=\frac{\partial}{\partial t}+\sum_{i=1}^{4} b_i(t,x,u)\frac{\partial}{\partial x_i}+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{4}\left[\sigma(t,x,u)\sigma(t,x,u)^t\right]_{ij}\frac{\partial^2}{\partial x_i\partial x_j} \quad (6)$$

It is also convenient to introduce the operator $Q:R^{+¿\times R^4¿}\ R$, which, acting on $V(t,x)$, has the following form:

$$QV(t,x)=trace\left[\sigma(t,x,u)^t V_x(t,x)^t V_x(t,x)\sigma(t,x,u)\right] \quad (7)$$

Now, we introduce the following definitions:

Definition 1 Let p∈(0,1] be arbitrary, Δt > 0 and $\{_k(t)\}$ a positive continuous and increasing sequence. The numerical scheme defined by (3) is called almost surely exponentially and robustly stable, if there exists a constant r > 0, such that

$$\lim {}^{¿}k\to\frac{1}{\log\lambda_k(t)}\log\|x_k\|^p\leftarrow r \qquad \text{a.s.}$$

Definition 2 Let Δt > 0 and $f:R\,R$ a continuous and increasing function. The numerical scheme defined by (3) is called asymptotically stable if there exists a constant l > 0 such that

$$\lim {}^{¿}k\to\frac{\log f(x_k)}{k}\leftarrow l$$

Observations.

Definition 1 is a strong variant of the definition of almost sure exponential stability, given in [3], which generalizes it, due to the use of $\lambda_k(t)$ function. The generalization proposed by Definition 2, with respect to the definition in [3], consists in smoothing the effect of the norm of x_k, through the use of the function f.

4. Main results

The next, is our main result in this paper:

Theorem 4 Let p∈(0,1] be arbitrary. Assume that the conditions of lemma 2.1 are satisfied and let $\{x_k\}_k$ a Markov process. If there exists a function $V(t,x)C^{1,2}¿$, a positive continuous and increasing sequence$\{\lambda_k(t)\}_k$, $\lambda_k: R \to R^{+¿¿}$, with $\lambda_k(t)\geq 1$, a continuous and non-negative function $g: RR$, such that

a) $LV(t,x) \leftarrow g(t)V(t,x), \forall t \in R^{+¿¿}$
b) $\| x_k \|^p \square_k(t) < V(t,x), \forall t \in R^{+¿, \forall k \in N¿}$

then, the numerical scheme defined by (3) is almost surely exponentially and robustly stable.

Proof.

Before to give the proof of theorem 4, we state the following result, called the *exponential martingale inequality*, which is a straightforward application of the Itô formula and that is a fundamental tool in the formulation of our results. For demonstration to see [Friedman,2].

Lemma 4.1 Let α, β, be any positive numbers. Let $x(t)$ be solution of the stochastic differential equation (4). If there exists a Lyapunov function $V(t,x)C^{1,2}¿$, satisfying (5) for a diffusion operator $LV(t,x)$, then

$$P\,¿$$

Proof of the theorem 4.

Let $z_1(t),\ z_2(t)$ be the processes:

$$z_1(t)=\sum_{k=0}^{\square} x_k 1_{[kt,(k+1)t]}(t), z_2(t)=¿\sum_{k=0}^{\square} x_{k+1} 1_{[kt,(k+1)t]}(t)¿$$

where $x_k$satisfies the equation (3). Using the equation (5) and Itô's formula, we have

$$dV(z_2(t),t)=V_t(z_2(t),t)dt+V_x(z_2(t),t)d\,z_2+\frac{1}{2}trace\left[\sigma(t,x)^t V_{xx}(t,x)\sigma(t,x)\right](9)$$

Now, using the expression:

$$d\log V(z_2(t),t)=¿\frac{1}{V(z_2(t),t)}\left[dV(z_2(t),t)-\frac{1}{2}\frac{1}{V(z_2(t),t)}dV(z_2(t),t)^2\right]¿$$

we have

$$\log V(z_2(t),t)=¿\log V(x_k,k)+\int_0^{t_{k+1}}\frac{1}{V(z_1(s),s)}\left[LV(z_1(s),s)-\frac{1}{2}\frac{QV(z_1(s),s)}{V(z_1(s),s)}\right]ds¿$$

$$+\int_0^{t_{k+1}}\frac{1}{V(z_1(s),s)}\sum_{k=1}^{n}\sum_{k=1}^{n}¿¿¿$$

Let's use Lemma 4.1, taking $T=t_{k+1},\ \beta=2\log C$, $\alpha=1$ and

$$\sigma(t,x)=¿¿$$

to get

$$P¿$$

Borel-Cantelli lemma allows to deduce the existence of a random integer k_0 such that, for all $k\geq k_0$ we have the following inequality

$$\int_0^{t_{k+1}} ¿¿¿¿$$

So, using (10), we have

$$\int_0^{t_{k+1}} \frac{1}{V(z_1(s),s)}\sum_{k=1}^{n}\sum_{k=1}^{n} ¿¿¿$$

and, by hypotheses (a) and (b), and equality (11), this turns out

$$\log V(z_2(t),t)\leq \log V(x_0,0)-\int_0^{t_{k+1}} g(t)\,dt+2\log C \quad (12)$$

Then, from (b), we get

$$\frac{1}{\log \lambda_k(t)} \log \| x_k \|^p \leq \frac{\log V(x_0,0)}{\log \lambda_k(t)} - \frac{\int_0^{t_{k+1}} g(t)\,dt}{\log \lambda_k(t)} + \frac{2 \log C}{\log \lambda_k(t)}$$

Finally, because sequence $\{ \lambda_k(t) \}_k$ is increasing and $g(t)$ is non-negative, there exists $r>0$, such that

$$\lim {}^{¿} k \to \frac{1}{\log \lambda_k(t)} \log \| x_k \|^p \leftarrow r \qquad \text{a. s.}$$

obtaining the desired conclusion.

■

The last result presented here, is the following theorem that concerns the asymptotic stability.

Theorem 5 Let $f : R\,R$ be a function continuous increasing, $\Delta t > 0$ and suppose that there exists a function $V(t,x) C^{1,2}¿$ and a constant $r>0$, such that

a) $f(x_k) \leq V(t,x), \forall\, t \in R^{+¿, \forall k \in N¿}$
b) $LV(t,x) \leftarrow r V(t,x), \forall\, t \in R^{+¿¿}$

then, the numerical scheme defined by (3) is asymptotically stable.

Proof. Let $V(t,x) C^{1,2}¿$ and $f : R\,R$ be the functions mentioned in the hypothesis. We can follow the argumentation exposed in the proof of Theorem 4 and, by equation (12) and hypothesis (b), we have

$$\frac{1}{k} \log V(z_2(t),t) \leq \frac{1}{k} \left[\log V(x_0,0) - r\, t_{k+1} + 2 \log C \right] (13)$$

from which, using hypothesis (a),

$$\frac{1}{k}\log f(x_k)\leq\left[\frac{\log V(x_0,0)}{k}-r\frac{t_{k+1}}{k}+\frac{2\log C}{k}\right](14)$$

Letting $k\rightarrow$, the first and the third term in right hand of (14) tend to 0 and, because $t_{k+1}\leq k+1$, there exist $l>0$ such that the conclusion is satisfied:

$$\lim\ ¿k\rightarrow\frac{1}{k}\log f(x_k)\leftarrow l$$

2. Example.

In this section, we shall discuss an example to illustrate our theory. We consider the following stochastic optimal control problem, see [1]:

To find controls $u_1¿(t),u_2¿(t)$ which steers the initial condition $x(0)=(1,0,0,0)$ of stochastic system

$$dx(t)=S_3x(t)dt+(S¿¿2u_2(t)+S_1u_1(t))x(t)dW¿(15)$$

to the final state $x\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)=(0,0,0,1)$, minimizing on the trajectory $x(t)¿,t\in[0,T]$, which is solution of (15), with $u_1(t)=u_1¿(t),u_2(t)=u_2¿(t)$, the following cost functional Bolza type:

$$J(u_1,u_1)=E\left[¿x^t\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)|O|x\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)>+\int_0^{\frac{\pi}{\sqrt{2}}}\left(u_1^2(t)+u_2^2(t)\right)dt\right]$$

where $E[f]$ denotes the conditional expectation with respect to f and O is the symmetric, negative definite matrix $O=x^{t}\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)x\left(\frac{\pi}{\sqrt{2}}\right)$.

We will apply Theorem 4 and Theorem 5 to get almost sure exponential robust stability of the zero solution of (15) and asymptotic stability, respectively.

Let consider, for $k \in N$ and

$$r \leftarrow \frac{M_3}{M_2} M_1 \frac{1}{k},$$

where M_1, M_2, M_3 are bound of $u_1(t)+u_2(t)$, $u_1^{'}(t)+u_2^{'}(t)$ and $2+4\left(u_1^{2}(t)+u_2^{2}(t)\right)$, respectively. We define the following Lyapunov function:

$$V(t,x)=\left(u_1(t)+u_2(t)\right)^{rk} \| x_k(t) \|^{2} (16)$$

Let consider the function $g: R R$ given by

$$g(t)=-\left(rk\frac{M_2}{u_1+u_2}+M_3\right)$$

and the sequence$\{\lambda_k(t)\}_k$ of functions $\lambda_k: R \to R^{+¿¿}$ defined as following:

$$\lambda_k(t)=¿u_1(t)+u_2(t)\vee¿^{rk}¿$$

and controls obtained in [1],

$$u_1^{¿}(t)=\frac{-1}{2}\Lambda(t)S_1x(t), u_2^{¿}(t)=\frac{-1}{2}\Lambda(t)S_2x(t),$$

where $\Lambda(t)$ is the adjoint state to $x(t)$.

Figure 1 shows the optimal stochastic controls obtained in [1], using Euler-Maruyama scheme, where we can see the choice $M_1=2, M_2=2$ and $M_3=10$.

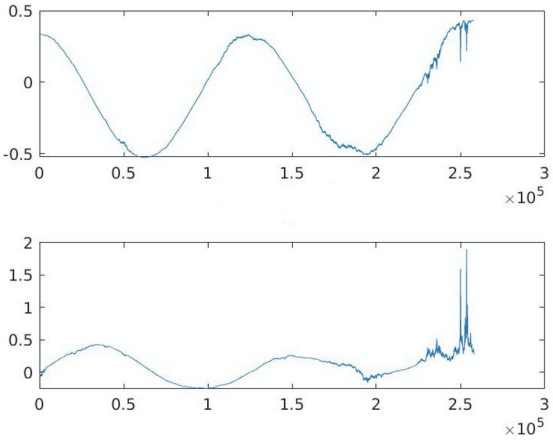


Figure 1. The stochastic bounded optimal controls $u_1^{¿}(t), u_2^{¿}(t)$

obtained in [1], using Euler-Maruyama scheme.

Therefore, in this case,

$$r \leftarrow \frac{10}{k}$$

We compute the corresponding diffusion operator associated to V ¿). Let's remember,

For a general system

$$dx(t)=b(t,x(t),u(t))dt+\sigma(t,x(t),u(t))dW$$

$$LV=\frac{\partial V}{\partial t}+\sum_{i=1}^{4} b_i(t,x,u)\frac{\partial}{\partial x_i}V+\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{4}\left[\sigma(t,x,u)\sigma(t,x,u)^t\right]_{ij}\frac{\partial^2 V}{\partial x_i \partial x_j}$$

where

$$b=\begin{pmatrix}0&0&-1&0\\0&0&0&1\\1&0&0&0\\0&-1&0&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{pmatrix},\sigma=\begin{pmatrix}0&-u_2&0&-u_1\\u_2&0&-u_1&0\\0&u_1&0&-u_2\\u_1&0&u_2&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{pmatrix}$$

So,

$$\sum_{i=1}^{4} b_i(t,x,u)\frac{\partial}{\partial x_i}V=2(-x_3,x_4,x_1,-x_2)\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{pmatrix}=0$$

and

$$\sigma\sigma^t=\begin{pmatrix}0&-u_2&0&-u_1\\u_2&0&-u_1&0\\0&u_1&0&-u_2\\u_1&0&u_2&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{pmatrix}\begin{pmatrix}0&u_2&0&u_1\\-u_2&0&u_1&0\\0&-u_1&0&u_2\\-u_1&0&-u_2&0\end{pmatrix}\begin{pmatrix}x_1\\x_2\\x_3\\x_4\end{pmatrix}^t$$

¿ $\| x \|^2(u_1^2+u_2^2)\begin{pmatrix}1&0&0&0\\0&1&0&0\\0&0&1&0\\0&0&0&1\end{pmatrix}$

then,

$$\frac{1}{2}\sum_{i,j=1}^{4}\left[\sigma(t,x,u)\sigma(t,x,u)^{t}\right]_{ij}\frac{\partial^{2}V}{\partial x_{i}\partial x_{j}}=\frac{1}{2}4\parallel x\parallel^{2}\left(u_{1}^{2}+u_{2}^{2}\right)2\left(u_{1}(t)+u_{2}(t)\right)^{rk}$$

Therefore,

$$LV(t,x)=\left(u_{1}+u_{2}\right)^{rk}\parallel x\parallel^{2}\left(rk\frac{u_{1}^{'}+u_{2}^{'}}{u_{1}+u_{2}}+2+4\left(u_{1}^{2}+u_{2}^{2}\right)\right)(17)$$

Clearly,

$$rk\frac{u_{1}^{'}+u_{2}^{'}}{u_{1}+u_{2}}+2+4\left(u_{1}^{2}+u_{2}^{2}\right)\leq rk\frac{M_{2}}{u_{1}+u_{2}}+M_{3}<0$$

so, we have

$$LV(t,x)\leftarrow g(t)V(t,x),\forall t\in R^{+¿¿}$$

and, for p∈(0,1]:

$$\parallel x_{k}\parallel^{p}\lambda_{k}(t)<V(t,x),\forall t\in R^{+¿,\forall k\in N¿}$$

Therefore, the conditions of Theorem 4 are satisfied and we conclude that Euler-Maruyama numerical scheme defined by (3) is almost surely exponentially and robustly stable, for all sufficiently small step sizes Δt_{k}.

By the other hand, we can use the Lyapunov function $V(t,x)$, defined in equation (16) and we choice $f(x)=x$ to apply Theorem 5 and to conclude that Euler-Maruyama numerical scheme defined by (3) is asymptotically stable.

5. Conclusion

In this paper, we focus on the stability properties of zero solution for a numerical scheme type Euler-Maruyama applied to two-level stochastic quantum system. Based in two new definitions for the control case, we have demonstrated the almost sure exponential robust stability and asymptotic stability of the numerical solution for the Euler-Maruyama numerical scheme in the stochastic controlled Schrödinger equation, to a stochastic quantum two-level system. These definitions differ from those given in [Mao,4] and [Tsoi,3], in that the diffusion term depends on the control and these definitions guarantees robustness of solutions. We apply these results in a Nuclear Magnetic Resonance (NMR) problem, which numerical solution was studied in [1], obtaining almost sure exponential robust stability and asymptotical stability for zero solution.

6. References

[1] Romero-Meléndez, C., González-Santos, L. (2019). Stochastic optimal control applied to a two-level quantum systems. *Proceedings of the 9th International Conference on Physics and Control (PHYSCON 2019)*, Innopolis, Kazan, Russia (pp. 230 - 235).

[2] Friedman, A. (1970). *Stochastic differential equations and applications*. Vol. 1. Academic Press.

[3] Tsoi, A. H., Zhang, B. (1997). Weak exponential stability of stochastic differential equations. *Stochastic Analysis and Applications Journal, 15 (4), 643-649.*

[4] Mao, X. (2015). Almost sure exponential stability in the numerical simulation of stochastic differential equations. *SIAM J. Numer. Anal*., *53(1), 370-389.*

[5] Mora, C. M., Mardones, H. A., Jiménez, J. C., Selva, M., Biscay, R. (2017). A stable numerical scheme for stochastic differential equations with multiplicative noise. *SIAM J. Numer. Anal., 55(4), 1614-1649.*

[6] Kushner, H. J. (1967). *Stochastic Stability and Control*. Academic Pres.

[7] Berkolaiko, G., Buckwar, E., Conall Kelly, C., Rodkina, A. (2012). Almost sure asymptotic stability analysis of the –Maruyama method applied to a test system

with stabilising and destabilising stochastic perturbations. *J. Comput. Math.* 15, 71-83.

Casos confirmados y mortalidad por COVID-19 en Sudamérica: un análisis comparativo por millón de habitantes

Nelson Huamaní[1*], Juan Orosco[2], Patricia Llaque[3], María Nuñez[1θ], Magaly Lizana[1ŧ]

[1]Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú.
[2]Departamento de Ciencias – Estadística, Universidad Privada del Norte, Lima, Perú.
[3]Instituto Nacional de Salud del Niño San Borja, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas, Lima, Perú.
*Departamento Académico de Matemática y Física; [θ]Escuela de Ciencias Físico Matemáticas – especialidad de Estadística; [ŧ]Sociedad Científica Medico Estudiantil San Cristóbal de Huamanga.
*nelson.berrocal@unsch.edu.pe; [θ]nunezarotomamariaestrella@gmail.com;
[ŧ]magaly.lizana.29@unsch.edu.pe; [2]juan.orosco@upn.edu.pe; [3]patriciallaque83@gmail.com

1. Resumen

El presente artículo muestra una comparación de los casos confirmados y muerte por la enfermedad por Coronavirus (COVID-19), entre países de Sudamérica, considerando casos por millón de habitantes y uniformizando el tiempo de contagio, desde el día de confirmación del caso cero para cada país. El objetivo es evaluar de manera más uniforme la propagación de este virus y de esta forma evaluar el resultado de las medidas adoptadas por los gobiernos en contra del COVID-19, ya que diversos centros de investigación muestran comparaciones sin tener en cuenta la proporción de habitantes, ni el tiempo (días) de contagio entre países. Al tener en cuenta estos factores en Sudamérica, se observa que la realidad es distinta a la que se informa en los medios comunicación, un ejemplo de ello es que Perú es el país más afectado en Sudamérica (solo superado por Ecuador en muertes por millón) y no Brasil.

2. Introducción

La enfermedad por Coronavirus 2019 (COVID-19) es una enfermedad con compromiso principalmente respiratorio que resulta de la infección por coronavirus 2 del síndrome respiratorio agudo severo (SARS-CoV-2)[1]. Tras los informes iniciales del brote de la enfermedad en China en diciembre del 2019, el COVID-19 se ha extendido en los primeros 3 meses en más de 100 países[2,3]. La evolución de esta pandemia en términos de incidencia, mortalidad y velocidad de expansión es heterogénea, estas diferencias entre países e incluso entre regiones del mismo país, requiere comprender los factores que impulsan su comportamiento[2].

Distintos trabajos revelan que existe subestimación generalizada de la magnitud de la epidemia. Es necesario mejorar la identificación de casos y la eficacia de los sistemas de vigilancia epidemiológica[4], para un mejor control y toma de decisiones adecuadas, que conlleven a un mejor manejo de esta enfermedad, que se resume en evitar más muertes. Por tal motivo este trabajo nos

permitirá evaluar en cierto sentido, el resultado de las medidas adoptadas por los gobiernos de Sudamérica, los cuales nos sugerirán (con los datos del número de casos confirmados y muertes) en que países está siendo más efectiva las medidas implementadas.

Para poder comparar las distintas realidades que se dan en Sudamérica, teniendo en cuenta que los países que la conforman no poseen demografía similar, y además su fecha de confirmación del caso cero por COVID-19, no es la misma. Consideramos los casos confirmados y muertes por millón de habitantes, y uniformizamos el tiempo de contagio, desde el día de confirmación del caso cero para cada país, con el fin de poder visualizar adecuadamente la cantidad de contagiados, sin que esta muestre sesgos por su población pequeña o grande y sin que el tiempo de contagio sea distinta. Así obtenemos resultados que salen de nuestra percepción lógica; un ejemplo claro es el caso de Brasil, si bien este país tiene el mayor número de contagiados en Sudamérica, pero en casos por millón, Brasil está por debajo de Perú, Chile y Ecuador.

3. Condiciones experimentales

En la investigación se realizó un estudio descriptivo y comparativo de la tasa de contagio por millón de habitantes, y el número de contagio y muerte por la COVID-19 en Sudamérica, considerando un tiempo uniforme, es decir, se recolectó información a partir del primer reporte del caso confirmado con la COVID-19 hasta el 15 de junio de 2020 en cada país sudamericano. Los datos del número de casos confirmados y muertes de cada país fueron tomados de *Our World in Data*[5], además de corroborar con informaciones oficiales correspondiente a cada país; la población total hasta el 28 de mayo de 2020 para cada país fue obtenido de *worldometer*s[6], a partir de estas informaciones se obtuvieron las tasas de contagio y muerte por millón de habitantes mediante:

$$N°\,de\,contagiados\,por\,millón\,de\,habitantes = \frac{N°\,de\,contagiados\,en\,el\,país}{Población\,total\,en\,el\,país}\,x\,10^6$$

$$N°\,de\,muertes\,por\,millón\,de\,habitantes = \frac{N°\,de\,muertes\,en\,el\,país}{Población\,total\,en\,el\,país}\,x\,10^6$$

Se realizaron análisis gráficos de escalas lineales y logarítmicos de los números de contagiados y muertes por la COVID-19, para la realización de cada uno de los gráficos se usó el paquete *ggplot2* del *software R,* Y para la edición de aspecto de las gráficas se usó el software *Inkscape*.

En Brasil se detectó el primer paciente con COVID-19 el 26 de febrero, seguido por Ecuador (29 de febrero), Chile (3 de marzo), Argentina (4 de marzo), Colombia y Perú (6 de marzo), Paraguay (7 de marzo), Bolivia (10 de marzo) y finalizando con Uruguay y Venezuela el 13 de marzo. Dado que existe un desfase en el reporte del primer caso en los países, se consideró en el análisis de la investigación realizar un corte transversal para algunas interpretaciones pertinentes a la investigación en el día 93 tomando como

referencia los países de Uruguay y Venezuela dado que estos presentan en total 95 días de contagio hasta el 15 de junio.

Cabe indicar que para el estudio no se tomó en cuenta factores como el número de pruebas realizadas, pues no se tiene un estimado de pruebas que se deba hacer para tener mejores muestreos de casos confirmados y muertes, teniendo en cuenta que en algunos países dichas pruebas escasean por la demanda.

Finalmente se realizó un pronóstico de los países que tienen mayor presencia de contagio por millón de habitantes, este pronóstico se realizó mediante los modelos ARIMA. siguiendo la metodología de Box y Jenkins[12] para cada país que consiste en el análisis exploratorio, identificación de los modelos, selección del modelo adecuado y estimación, adecuación de los modelos y finalmente la predicción. Los modelos ARIMA propuesto por Box y Jenkins es una de las técnicas de modelamiento para series temporales, que consiste en ajustar modelos auto-regresivos integrados de medias móviles a un conjunto de datos, son expresados como *ARIMA(p,d,q),* donde el parámetro *p* es el orden de un proceso autorregresivo, *d* es el orden de diferencia para que la serie sea estacionaria y *q* el orden de un proceso de medias móviles. En los procesos de Box y Jenkins se usaron gráficas de autocorrelación y autocorrelación parcial, pruebas de raíces unitarias de Dickey y Fuller, Prueba de Ljung y Box, los criterios de información de Akaike(AIC) y de Schwarz(BIC) para obtener los mejores modelos para cada país y finalmente se realizaron predicciones puntuales y por intervalo. El análisis de pronósticos se realizó con el *software R* usando los paquetes *tseries, forecast* y *timeSeries.*

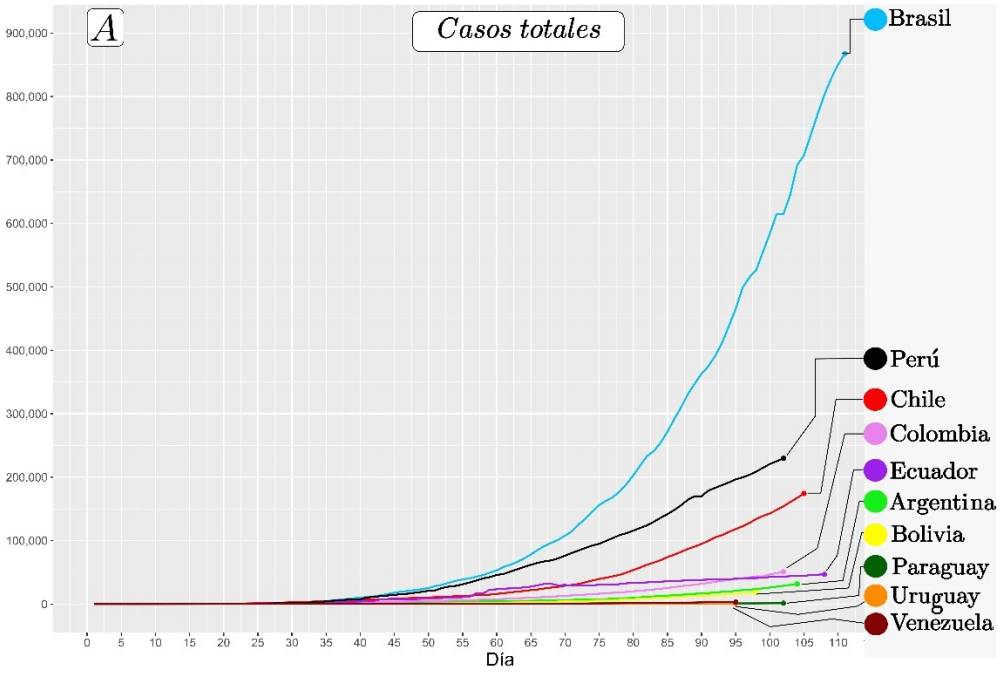
4. Resultados y discusión

Considerando desde el primer caso confirmado de COVID-19 para cada país, en las figura 1A se aprecia que el número de casos confirmados en Brasil presenta una tendencia creciente muy comúnmente mal llamado crecimiento exponencial, pues, aunque presenta un crecimiento veloz sabemos que nunca será un crecimiento completamente exponencial porque se espera que en algún momento este crecimiento se mantenga casi constante o constante, también se aprecia que Perú y Ecuador aparentemente siguen la misma tendencia, siendo estos los países que presentan mayor número de contagios, sin embargo, observando el número de contagios por millón de habitantes de cada país figura 1B, se muestra que los países que presentan mayor número de casos confirmados son liderados por Chile y Perú con una tendencia rápidamente creciente superando los 6000 y 5500 casos confirmados por millón de habitantes respectivamente, seguidos de Brasil superando los 3000 y Ecuador cercano a 2500 casos confirmados por millón de habitantes, considerando que ambos países presentan más días desde el primer registro de contagio que Perú y Chile.

Respecto al número de muertos por la COVID-19, Brasil es el país con el mayor número de muertes en Sudamérica superando los 35 mil, seguido de Perú con más de 5 mil muertes y Ecuador con más de 3500 muertes desde la identificación del primer caso confirmado. Observando el número de muertes por millón de habitantes figura 2B, se observa que Ecuador lidera el número de muertos por COVID-19 superando los 200 muertos por millón de habitantes, seguido de Brasil y Perú con más de 160 muertes por millón de habitantes.

Además, cabe recalcar la cantidad de población que tiene cada país, mostrado en la tabla 1, donde se observa que Brasil supera 12 veces la población de Ecuador, 11 veces la población de Chile y 6 veces la población de Perú, mostrándonos indicios de que no es viable las interpretaciones usuales acerca del número de casos confirmados y muertes, siendo una interpretación más objetiva con los casos confirmados y muertes por millón de habitantes.

Para una mejor visualización respecto a la tendencia de rapidez de aumento de los casos confirmados y muertes por millón de habitantes por la COVID-19, en la figura 3A en escala logarítmica, se observa que para 1 a 10 casos confirmados, la mayoría de países presentan una velocidad de crecimiento muy similares excepto de Venezuela que presenta un crecimiento desacelerado, y contradictoriamente Uruguay presentando una tendencia de aumento veloz, siendo el único país con esta característica; y para 10 a 1000 casos confirmados se observa claramente que Perú, Chile, Ecuador y Brasil presentan una velocidad de aumento más rápido que el resto de países sudamericanos,



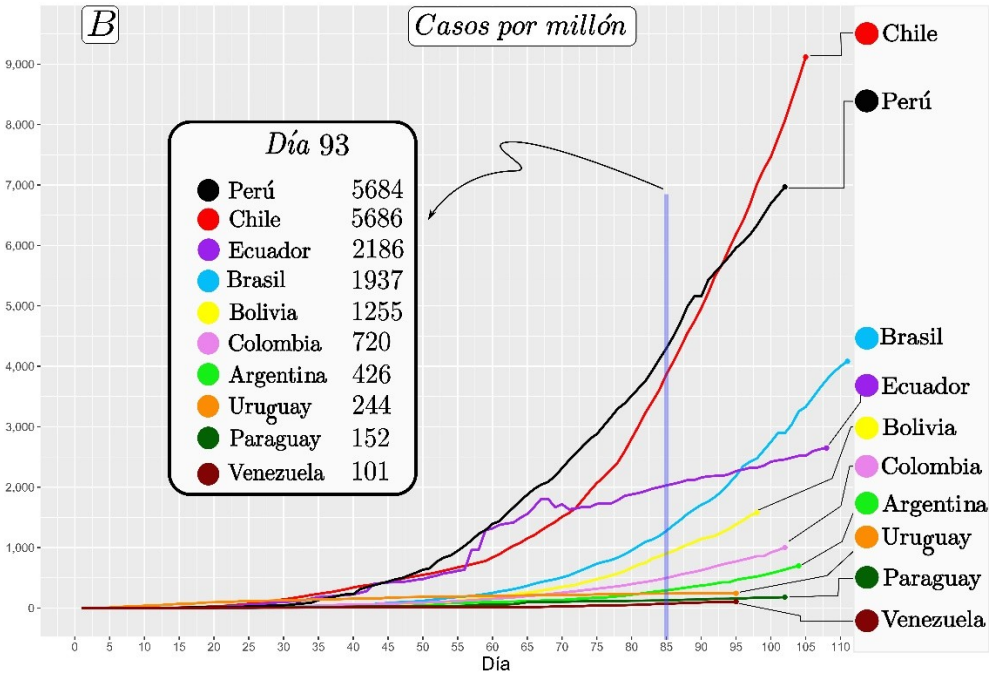
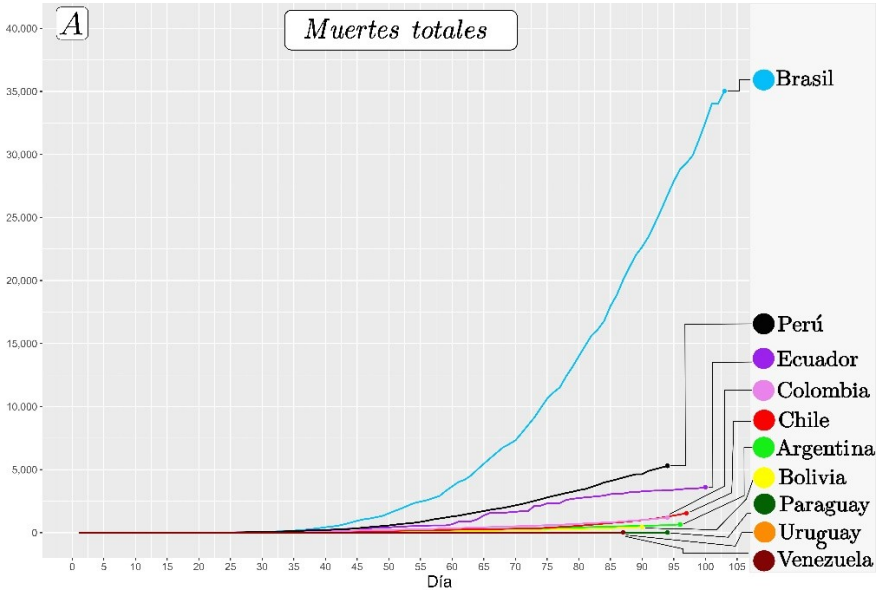


Figura 1: *(A) Número de casos confirmados vs días de contagio. (B) Número de casos confirmados por millón de habitantes vs dias de contagio, con un corte en el día 93 donde se desglosa la cantidad de casos conformados para cada país en ese día. Grafícas a escala linial, desde el registro del primer caso confirmado con COVID-19.*

los países excepto de Uruguay parecen seguir la misma tendencia, sin embargo el aumento de contagios tiende a ser más lento; en este intervalo también se observa que Uruguay a partir de los 100 casos confirmados presenta una tendencia casi constante, siendo este el país que mejor tiene controlado el número de contagios por millón de habitantes.



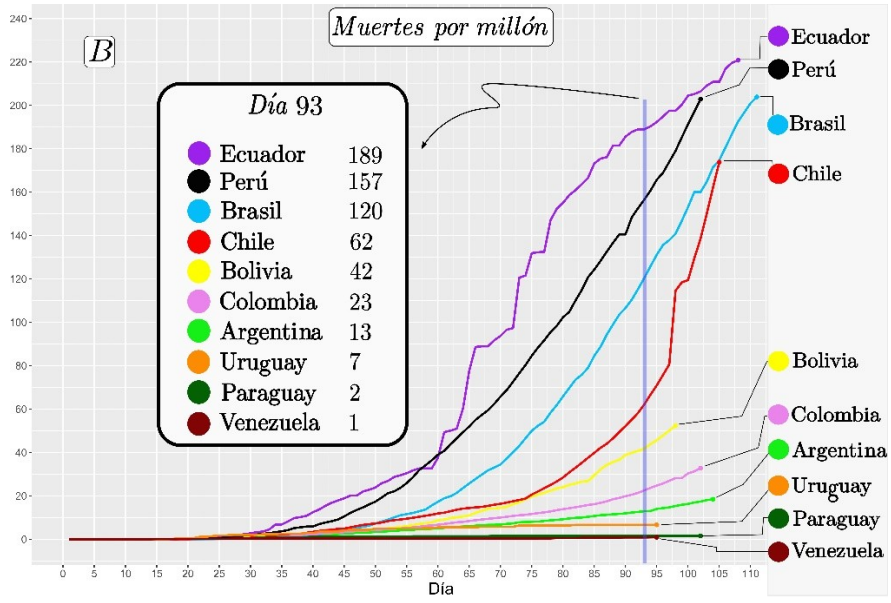


Figura 2: *(A) Número de personas fallecidas vs días de contagio. (B) Número de personas fallecidas por millón de habitantes vs días de contagio, con un corte en el día 93 donde se desglosa la cantidad de muertes para cada país en ese día. Graficas a escala linial, desde la confirmación del primer caso por la COVID-19.*

Respecto al número de muertes por millón de habitantes por la COVID-19, según la figura 3B en escala logarítmica se aprecia que los países que presentan una velocidad de crecimiento rápido son Ecuador, Perú y Brasil, seguido de Chile con una tendencia a continuar en ascenso; los países donde se aprecia que el número de muertes por millón de habitantes no continua en ascenso o ascenso muy lento son Uruguay y Paraguay, se puede observar también que Venezuela a partir de los último 7 días presenta una tendencia es de ascenso.

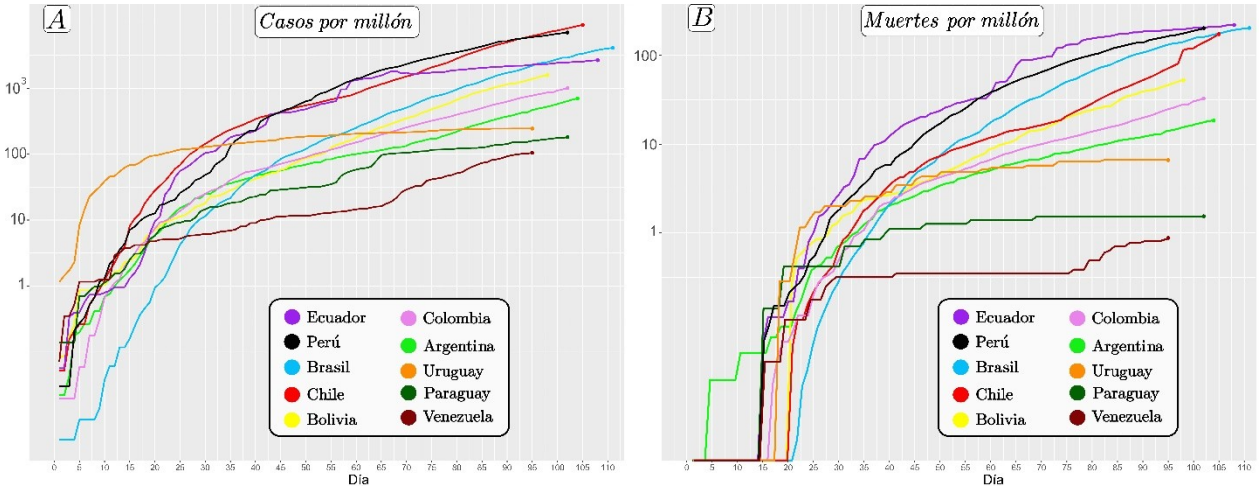


Figura 3: *(A) Número de casos confirmados vs días de contagio. (B) Muertes por millón de habitantes vs días de contagio. Graficas en escala logarítmica, desde el primer día de registro del paciente con COVID-19.*

Tabla 1: *Número de habitantes y días desde el registro del primer caso confirmado, y promedios del número de casos confirmados, número de casos confirmados por millón de habitantes, número de personas fallecidas y número de personas fallecidas por millón de habitantes por la COVID-19, desde el primer día de registro del caso confirmado hasta el día 93 para cada país.*

País	Promedio de casos confirma-dos	Promedio de casos confirma dos por millón de hab.	Promedio de n° de muertes	Promedio de n° de muertes por millón de hab.	N° de días desde el caso cero hasta el 15-Junio	N° de habitantes
Argentina	4464,42	98,78	182,1	4,03	104	45195777
Bolivia	2876,81	246,45	110,32	9,45	98	11673029
Brasil	76218,71	358,58	4970,62	23,38	111	212559417
Chile	21409,92	1119,99	230,62	12,06	105	19116201
Colombia	8254,12	162,22	296,25	5,82	102	50882884
Ecuador	14133,95	801,11	930,88	52,76	108	17643054
Paraguay	367,97	51,59	6,81	0,95	102	7132530
Perú	44717,14	1356,22	1259	38,18	102	32971854
Uruguay	544,13	156,64	12,54	3,61	95	3473727
Venezuela	627,57	22,07	8,98	0,32	95	28435943

De la tabla 1, respecto al promedio de casos confirmados y promedio de casos confirmados por millón de habitantes por la COVID-19 (el promedio está dado como el total de casos hasta el día 93 entre el total de días que es 93 se puede observar que, aunque Brasil presente un promedio mayor de número de casos confirmado, su promedio por millón de habitantes es mucho menor respecto a Chile, Ecuador y Perú. Comparando con los promedios de Perú, se observa que en el número de casos confirmados es menor solamente al de Brasil con un valor de 44717,14 y 76218,71; sin embargo los casos confirmados por millón de habitantes se diferencian considerablemente presentando ahora un mayor número promedio en Perú con un valor 1356,22 y para Brasil un valor de 358,58 casos confirmados en promedio por millón de habitantes; respecto a los promedio del número de muertes, Brasil presenta mayor promedio, sin embargo por millón de habitantes se observa que Ecuador supera ampliamente a los demás países con un promedio de 52,76 y seguido de Perú con 38,18 decesos por millón de habitantes.

Tabla 2: Coeficientes estimados y prueba de autocorrelación de los residuales Ljung y Box de los modelos ARIMA, para el número de casos confirmados por millón de habitantes de Brasil, Chile, Ecuador y Perú, desde el inicio del primer registro de contagio hasta el 15 de junio.

País	Coeficientes (s.e)	Ljung-Box (p-valor)

Brasil ARIMA(3,2,2)	AR(1)	AR(2)	AR(3)	MA(1)	MA(2)	0.5053 (0.4772)
	-0.9222 (0.1380)	-0.4112 (0.1641)	-0.1855 (0.1203)	0.251 (0.1048)	-0.625 (0.0832)	
Chile ARIMA(1,2,3)	AR(1)	MA(1)	MA(2)	MA(3)		0.0923 (0.7613)
	0.7856 (0.1012)	-1.3461 (0.1178)	0.2307 (0.1849)	0.3389 (0.1102)		
Ecuador ARIMA(0,1,2)	MA(1)		MA(2)			0.1726 (0.6778)
	-0.0042 (0.0889)		0.476 (0.0792)			
Perú ARIMA(0,2,1)	MA(1)					0.7125 (0.3986)
	-0.7547 (0.0580)					

4.1 Pronósticos a corto plazo

Se realizaron los ajustes de modelos ARIMA para el número de contagio por millón de habitantes, desde el primer registro de contagio hasta el 15 de junio y los pronósticos hasta 3 semanas hacia adelante, es decir hasta el 6 de julio para los países de Brasil, Chile, Ecuador y Perú. En la Tabla 2 se muestran las estimaciones de los parámetros de los modelamientos ARIMA para cada país, así también el estadístico de Ljung y Box; se observaron que en cada uno de los modelos según el estadístico de Ljung y Box los residuales de cada modelo no presentan autocorrelaciones, es decir los residuales presentan un comportamiento de ruido blanco, con valores significativos altos, de esta manera no rechazando las hipótesis nula de independencia de los residuales y evidenciando la adecuación óptima de los modelos.

De la gráfica de los pronósticos del número de casos confirmados por millón de habitantes se observa que hasta el 6 de Julio; Chile seguirá su tendencia creciente del número de contagio, al igual que Brasil y Perú que no parecen cambiar su tendencia, sin embargo, Ecuador espera disminuir el número de contagios y posiblemente mantener una tendencia constante en las últimas dos semanas a 6 de julio.

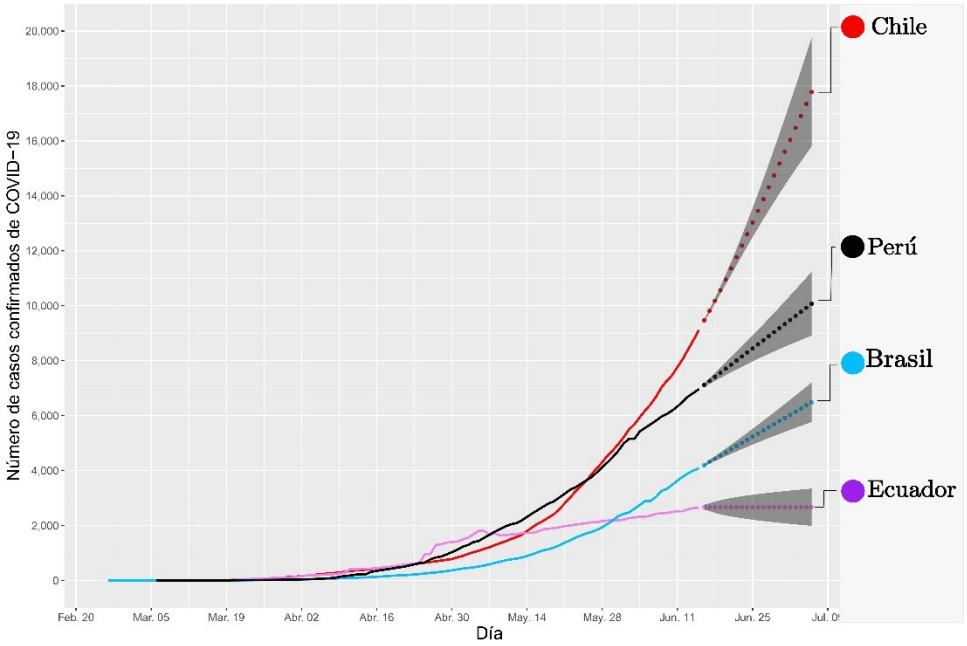


Figura 4: *Pronóstico del número de casos confirmados por millón de habitantes desde el 16 de junio hasta el 6 de julio, puntual y por intervalo a un nivel del 95% de confianza, formada por las lineas punteadas.*

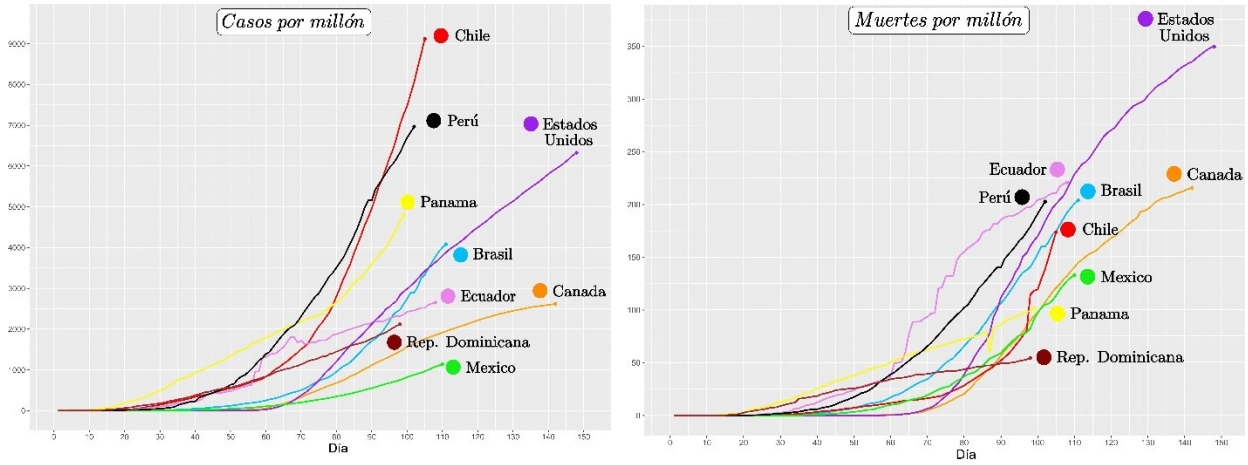


Figura 5: *(A) Número de casos confirmados vs días de contagio por millón de habitantes. (B) Número de personas fallecidas por millón de habitantes vs días de contagio, de los países con mayor incidencia de COVID-19, desde la confirmación del primer caso por la COVID-19.*

Comparando las incidencias respecto a algunos países de América, en la figura 5 se observa que Chile, Perú presentan mayores números de casos conformados por millón de habitantes, superando incluso a Estados Unidos y por mucho a Canadá y México; Panamá parece seguir la misma tendencia de Chile y Perú. Sin embargo, comparando el número de muertes por millón de habitantes Estados Unidos supera los 350, y los países sudamericanos tienden a seguir el mismo comportamiento.

5. Conclusiones

Observando los resultados del procesamiento de los datos hasta el 07 de junio de 2020. El caso especial de Perú, Ecuador y Chile es muy alarmante, Ecuador es el país que tiene mayor número de muertes por millón de habitantes. Perú es el país con más casos confirmados por millón de habitantes seguido por Chile, y la cantidad de muertes por millón de habitantes esta solo por debajo de Ecuador. Desde el enfoque comparativo de este estudio nos muestra que las medidas adoptadas en estos países para frenar la propagación de la COVID-19 no han sido efectivas reflejado en el número de contagios por millón de habitantes y que el sistema de salud ha colapsado con el resultado de la elevada mortalidad por esta enfermedad.

El hecho que un país tenga mayor número de contagiados y muertos que otros no significa que en proporción al número de habitantes también lo sea, como se observó para el caso de muertes por JHUM[7]. Esto lo podemos ver claramente en el caso de Brasil el cual tiene el mayor número de contagiados en Sudamérica, pero al considerar los casos por millón, vemos que Brasil está por debajo de Perú, Chile y Ecuador, en clara diferencia con lo afirmado por una editorial de la revista prestigiosa *The Lancet*[7]. Lo mismo sucede si vemos en el caso de la cantidad de muertos por millón de habitantes. Estos resultados evidencian que en la mayoría de países sudamericanos no disminuirá el número de casos y muertes a un corto plazo, ya que los incrementos de los casos por día aumentan de manera considerable cada día. Sin embargo, se debe de reconocer que una de las limitaciones del estudio es no considerar la densidad poblacional, datos que no han sido registrados por los países, entre otros factores.

Las intervenciones no farmacéuticas como la cuarentena, han tenido un gran efecto en la reducción de la transmisión del COVID-19 en Europa[9]. Sin embargo, el caso de Perú es singular, pues a la fecha (15 de junio del 2020) con más de 92 días de cuarentena y siendo el primer país en implementar la cuarentena es el que está siendo más afectado por la COVID-19, como ya evidenció *Elpaís*[10]. Las medidas implementadas, como la cuarentena obligatoria en todo el país, no ha dado los resultados esperados. Sin embargo, reconociendo que también sin esas medidas posiblemente el Perú estaría lamentando más registros de casos confirmados y decesos. También, esto reflejaría la débil infraestructura y equipamiento en el sector salud, la informalidad laboral, la falta de agua potable, el clima y ubicación geográfica[11], entre otros factores que están llevando a este país a consecuencias negativas.

Una limitación del estudio es que no se ha revisado el contagio y mortalidad por COVID-19 en distintas regiones del país, los cuales aparentemente, siguen curvas distintas.

6. Bibliografía

1. Centers for Disease Control and Prevention, Coronavirus Disease 2019 (COVID-19). [Internet]. EE. UU: 2020 [citado el 02 de junio del 2018]. Disponible en https://www.cdc.gov/coronavirus/2019-ncov/summary.html
2. Organización Mundial de la Salud. Novela Coronavirus (2019-nCoV) Situación Reporte- 59 19 marzo 2020. OMS boletín 2020 [Internet], Ginebra: OMS; 2020 [citado el 29 de mayo 2020]. Disponible en https://www.who.int/docs/default-source/coronaviruse/situation-reports/20200319-sitrep-59-covid-19.pdf?sfvrsn=c3dcdef9_2
3. Wu Z, McGoogan JM., Características y lecciones importantes del brote de la enfermedad por coronavirus 2019 (COVID-19) en China. JAMA. Publicado en línea el 24 de febrero de 2020. doi:10.1001/jama.2020.2648
4. Medeiros Delaware Figueiredo UNA, et Alabama. Letalidad del COVID-19: ausencia Delaware patrón epidemiológico Gac Sanit 2020. doi: 10.1016/j.gaceta.2020.04.001
5. Our World in Data. Estadística e investigación, casos de coronavirus (COVID-19), 2020 [Internet]. Gales: Global Change Data; 2020 [citado el 07 junio del 2020]. Disponible en: https://ourworldindata.org/covid-cases
6. Worldometer, COVID-19 [Internet] EE. UU: Worldometer 2020. [citado el 29 de mayo del 2018]. Disponible en https://www.worldometers.info/coronavirus/
7. John Hopkins University of Medicine [Internet]. Baltimore; 2020 [citado el 07 junio del 2020]. MAPS & TRENDS, Mortality Analyses; Disponible en: https://coronavirus.jhu.edu/data/mortality
8. Editors of The Lancet., COVID-19 in Brazil. “So what?”. The Lancet. Volume 395 Number 10235: p1461. doi: 10.1016/S0140-6736(20)31095-3
9. Seth Flaxman, Swapnil Mishra, Axel Gandy, H. Juliette T. Unwin, Thomas A. Mellan, Helen Coupland, et al. Estimating the effects of non-pharmaceutical interventions on COVID-19 in Europe. Nature. doi: 10.1038/s41586-020-2405-7 (2020).
10. Elpaís, [Internet]. España; 2020 [citado el 08 junio del 2020]. Países con mayo exceso de muertes; Disponible en: https://elpais.com/sociedad/2020-06-05/espana-es-el-pais-con-el-segundo-mayor-exceso-de-muertes-durante-la-crisis-del-coronavirus.html
11. Arias-Reyes C, Zubieta-DeUrioste N, Poma-Machiacao L, Aliaga-Raduan F, Carbajal-Rodriguez F, et al. Does the pathogenesis of SARS-CoV-2 virus decrease at hight-altitude? Respiratory Physiology & Neurobiology. 2020; 277. doi: 10.1016/jresp.2020.103443
12. G.E.P. Box and G. M. Jenkins 1970 Time Series Analysis Forecasting and Control, Holden day, San Francisco.

Estimación de la tasa de emisión de una fuente contaminante: análisis de las soluciones obtenidas con diferentes tipos de datos

Parra-Guevara, D., **Skiba, Y. N.,** **Bustamante-García, F. J.**

Centro de Ciencias de la Atmósfera, Universidad Nacional Autónoma de México

Circuito Exterior, Ciudad Universitaria, CDMX, C. P. 04510, México

pdavid@atmosfera.unam.mx, skiba@unam.mx, snel.nsi@gmail.com

1. Resumen

En este trabajo se presenta un método inverso para estimar la tasa de emisión de una fuente puntual no-estacionaria que emite un contaminante hacia la atmósfera. El método se formula como un problema variacional (regularización tipo Tijonov). Se analizan ejemplos numéricos de la estimación de la tasa de emisión utilizando una versión unidimensional del modelo de dispersión. El método inverso se puede aplicar tanto para una serie de tiempo de la concentración de un contaminante atmosférico, es decir, datos recabados en una estación de monitoreo, como para datos de la concentración distribuidos en un dominio a un tiempo fijo. Las estimaciones del método son diferentes con respecto a estos conjuntos de datos. Se obtiene un buen resultado en la recuperación de la tasa de emisión usando series de tiempo, mientras que los datos espacialmente distribuidos no son viables para resolver el problema inverso.

2. Introducción

En forma general, los problemas inversos consisten en la determinación de las causas a partir del conocimiento de los efectos en un sistema (modelo). Siendo los efectos los valores observados de las variables de estado, y las causas las condiciones iniciales, forzamientos o valores de parámetros que tienen la capacidad de conducir al sistema hasta dicho comportamiento. De esta forma, cada problema inverso corresponde a un problema directo, siendo estos últimos aquellos problemas donde para un conjunto de causas conocidas se pronostican los efectos en un sistema.

Una característica significativa es que, aún cuando los problemas directos están bien formulados, los problemas inversos correspondientes caen frecuentemente en el campo de los problemas mal formulados, es decir, son problemas que presentan diferentes tipos de inestabilidad, o no satisfacen la existencia o la unicidad de la solución [1]. De esta forma, la determinación de una solución en un problema inverso requiere, además de la comprensión del problema directo (sistema), la introducción de métodos capaces de atenuar el proceso de inestabilidad para así poder seleccionar una solución congruente con el fenómeno en estudio. Dichos métodos se conocen como *regularizaciones del problema inverso* [1]. Entre tales métodos son importantes aquellos introducidos

por Tijonov [2], los cuales consisten en la minimización de un funcional que agrupa el error en los datos, y alguna norma para las variables de control y sus derivadas [1,2].

Entre las técnicas de modelación inversa también destacan aquellas basadas en el uso de las funciones adjuntas y un principio de dualidad. La estimación dual usa la solución del modelo adjunto como núcleo en una ecuación integral, y tiene la ventaja de presentar en forma explícita la influencia que las condiciones iniciales y los forzamientos tienen sobre las variables de estado del sistema [3].

En este trabajo se aplica esta técnica, junto con una regularización del tipo Tijonov, para obtener la solución de un problema inverso en el contexto de la estimación de fuentes contaminantes. El problema a tratar consiste en la recuperación de la tasa de emisión no-estacionaria de una fuente puntual desconocida a partir de los datos de concentración en algunos sitios de monitoreo (series de tiempo o datos espacialmente distribuidos). La solución de este problema inverso permite estimar y verificar inventarios de emisiones de diversas sustancias tóxicas de origen químico o biológico, así como para detectar la intensidad y ubicación de fuentes desconocidas que emiten contaminantes atmosféricos [3,4]. El objetivo del trabajo es estudiar el desempeño de la regularización del problema inverso cuando diferentes conjuntos de datos son utilizados (series de tiempo y datos espacialmente distribuidos). Dicho análisis permite determinar el tipo de información que es más adecuada para lograr una buena recuperación de la tasa de emisión de una fuente desconocida.

3. Modelos y regularización del problema inverso

En esta sección se considera el siguiente modelo de difusión-reacción de dimensión uno para describir la concentración del contaminante $\phi = \phi(x,t)$.

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 \phi}{\partial x^2} - \sigma \phi = Q(t)\delta(x - x_0), \quad 0 < x < \ell, \quad 0 < t < T \tag{1}$$

$$\mu \frac{\partial \phi}{\partial x}(0,t) = 0, \quad t > 0 \tag{2}$$

$$\mu \frac{\partial \phi}{\partial x}(\ell,t) = -\varsigma \phi(\ell,t), \quad t > 0 \tag{3}$$

$$\phi(x,0) = 0, \quad 0 < x < \ell \tag{4}$$

En la ecuación (1), $\sigma > 0$ representa el coeficiente de transformación del contaminante, $\mu > 0$ es el coeficiente de difusión y x_0 denota el sitio de la fuente puntual en el dominio $D = (0, \ell)$ con tasa de emisión desconocida $Q(t)$. La condición de frontera (2) significa que no hay flujo del contaminante a través de $x = 0$, es decir, en esta parte la frontera está cerrada. La condición (3) significa que en $x = \ell$ la frontera está abierta, y el flujo del contaminante es proporcional a la concentración ϕ, donde el coeficiente de proporcionalidad es $\varsigma > 0$. En consecuencia, la masa del contaminante en el dominio D se incrementa debido a la tasa de emisión Q, y decrece a causa del flujo de salida por el punto frontera $x = \ell$ y la transformación química. Es decir, el modelo (1)-(4) satisface la siguiente *ecuación de balance de masa*:

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_0^{\ell} \phi(x,t)dx = Q(t) - \varsigma\phi(\ell,t) - \sigma\int_0^{\ell} \phi(x,t)dx \tag{5}$$

Además, el modelo de dispersión (1)-(4) está bien formulado en el sentido de Hadamard, ya que su solución existe, es única y depende continuamente de la condición inicial y el forzamiento [3]. Dicha solución se expresa en una serie de Fourier en la siguiente forma:

$$\phi(x,t) = \sum_{k=1}^{\infty}\left(\int_0^t d_k Q(\xi) e^{-(\lambda_k^2\mu+\sigma)(t-\xi)} d\xi\right)\cos(\lambda_k x) \tag{6}$$

donde los coeficientes d_k están determinados por la ecuación

$$d_k = 2\cos(\lambda_k x_0)[\ell + \frac{\mu}{\varsigma}\text{sen}^2(\lambda_k \ell)]^{-1}, \quad k = 1,2,\ldots \tag{7}$$

,

y $\{\cos(\lambda_k x)\}_{k=1}^{\infty}$ es un sistema ortogonal de funciones que corresponde a las frecuencias $\{\lambda_k\}_{k=1}^{\infty}$. Tales frecuencias son las raíces de la ecuación $\varsigma\cos(\lambda\ell) - \lambda\mu\text{sen}(\lambda\ell) = 0$,

las cuales pueden ser eficientemente calculadas con algún método numérico, por ejemplo, con el método de Newton. En los experimentos numéricos se usa la serie de Fejér obtenida a partir de la serie de Fourier (6). Tal corrección es necesaria para asegurar la convergencia puntual de la serie a la función $\phi(x,t)$. Esto significa que en la serie (6) se utilizan los siguientes coeficientes de Fejér:

$$\tilde{d}_k = \left(1 - \frac{(k-1)}{K}\right) d_k, \quad k = 1,2,\ldots K \tag{8}$$

en lugar de los valores d_k. Aquí, K es el número de truncación de la serie.

Por otra parte, la aplicación de la identidad de Lagrange al sistema de ecuaciones (1)-(4) conduce al siguiente modelo de dispersión adjunto [3]:

$$-\frac{\partial g}{\partial t} - \mu \frac{\partial^2 g}{\partial x^2} + \sigma\phi = p(x,t), \quad 0 < x < \ell, \quad 0 < t < T \tag{9}$$

$$\mu \frac{\partial g}{\partial x}(0,t) = 0, \quad t > 0 \tag{10}$$

$$\mu \frac{\partial g}{\partial x}(\ell,t) = -\varsigma g(\ell,t), \quad t > 0 \tag{11}$$

$$g(x,T) = 0, \quad 0 < x < \ell \tag{12}$$

donde el forzamiento en la ecuación (9) se define como

$$p(x,t) = \delta(x - R)\delta(t - \tau) \tag{13}$$

para un sitio de monitoreo R en el dominio D y un instante τ en el intervalo $(0,T)$. Es importante notar que la función adjunta se calcula resolviendo el modelo (9)-(12) hacia atrás en el tiempo, es decir, de $t = T$ a $t = 0$; por lo tanto, $g(x_0,t) = 0$ para $\tau < t < T$.

La combinación de las soluciones de los modelos directo y adjunto permite establecer el principio de dualidad para la concentración de un contaminante [3]:

$$\phi(R,\tau) = \int_0^T Q(t) g(x_0, t)\, dt \tag{14}$$

Note que la función adjunta no depende de la tasa de emisión $Q(t)$ y que es el núcleo de la ecuación integral (14). Dicha función también se expresa a través de una serie de Fourier como sigue:

$$g(x_0,t) = \sum_{k=1}^{\infty} c_k e^{-\left(\lambda_k^2 \mu + \sigma\right)(\tau - t)} \cos(\lambda_k x_0), \quad t \le \tau \tag{15}$$

donde los coeficientes de Fourier c_k se calculan en la siguiente forma:

$$c_k = 2\cos(\lambda_k R)[\ell + \frac{\mu}{\varsigma}\text{sen}^2\left(\lambda_k \ell\right)]^{-1}, \quad k = 1,2,\ldots \tag{16}$$

Como se explico previamente, en los experimentos numéricos se consideran los siguientes coeficientes de Fejér para la serie (15):

$$\bar{c}_k = \left(1 - \frac{(k-1)}{K}\right) c_k, \quad k = 1,2,\ldots,K \tag{17}$$

en lugar de los coeficientes c_k. Nuevamente, K denota el número de truncación de la serie (15).

Una vez descritos los modelos de dispersión y su adjunto, junto con sus respectivas soluciones, es posible formular el método para estimar la tasa de emisión

$Q(t)$ de una fuente contaminante. Para dicha estimación se pueden considerar datos en forma de una serie de tiempo $\{\phi(R,t_j)\}$, o datos distribuidos en el espacio a un tiempo fijo $\{\phi(R_i,T)\}$. En cualquier caso, se debe considerar que este problema inverso es inestable con respecto a los errores en los datos de concentración [5,6], por lo cual se introduce una regularización de tipo Tijonov para lograr una mejor estimación de $Q(t)$.

$$\text{Minimizar} \quad J(Q)=\frac{1}{2}\int_0^T\left(\frac{dQ}{dt}\right)^2 dt \tag{18}$$

$$\text{Sujeto a:} \quad -\varepsilon \le \phi_j - \int_0^T Q(t)g_j(x_0,t)dt \le \varepsilon, \quad j=1,..,M \quad \text{y} \tag{19}$$

$$Q(t)\ge 0, \quad 0\le t\le T \tag{20}$$

El objetivo de minimizar el funcional J es reducir las variaciones u oscilaciones espurias en $Q(t)$ que son inducidas por los errores en los datos de concentración y la inestabilidad. Note que por (14) es posible escribir $\phi(R,t_j)=\int_0^T Q(t)g_j(x_0,t)dt$, por lo que las restricciones en (19) se interpretan como la aproximación de la concentración teórica hacia los datos de concentración experimental ϕ_j. Aquí se asume que cada dato ϕ_j contiene un error $\delta\phi_j$ desconocido, es decir, $\phi_j=\phi(R,t_j)+\delta\phi_j$. El *parámetro de regularización* $\varepsilon>0$ determina el nivel de dicha aproximación y su valor depende del valor máximo de los errores en los datos [7]. Por último, la restricción (20) limita la búsqueda de la tasa de emisión entre las funciones con valores no-negativos.

Note que el problema variacional (18)-(20) se ha escrito suponiendo que los datos forman una serie de tiempo. También es posible obtener una formulación equivalente para datos espacialmente distribuidos considerando que por (14) $\phi(R_i,T)=\int_0^T Q(t)g_i(x_0,t)dt$, y sustituyendo (19) por $-\varepsilon \le \phi_i - \int_0^T Q(t)g_i(x_0,t)dt \le \varepsilon$. De esta forma, la recuperación de la tasa de emisión se plantea como la resolución de problemas de optimización similares pero utilizando diferentes tipos de datos. En la siguiente sección se analizan ejemplos numéricos de ambos casos.

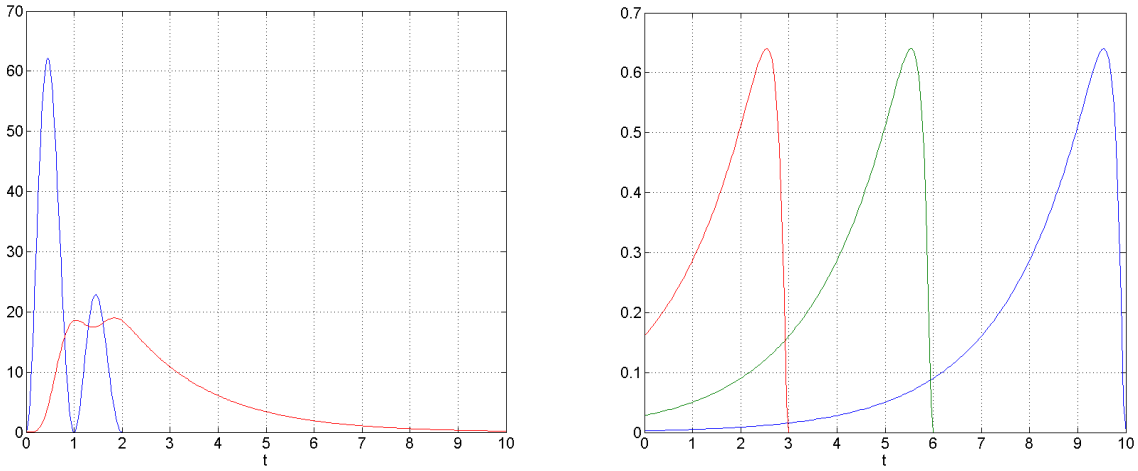
4. Ejemplos numéricos y discusión

En esta sección se considera la siguiente función de prueba $Q(t)$:

$$Q(t) = \begin{cases} Ae^{-\gamma t}\text{sen}^2(\pi t), & 0 \le t \le 2 \\ 0, & 0 < t \le T \end{cases} \tag{21}$$

El método de regularización que ha sido formulado como un problema variacional se aplica usando diferentes tipos de datos de concentración para recuperar dicha función.

El primer ejemplo numérico utiliza una serie de tiempo con datos de concentración espaciados uniformemente en el tiempo y un tamaño de paso $\Delta t = 0.05$. La figura 1a muestra la tasa de emisión de prueba $Q(t)$ definida por la ecuación (21) y la correspondiente concentración $\phi(R,t)$ calculada a través de la serie de Fourier-Fejér (6). En este caso, los valores de los parámetros adimensionales utilizados son: $\mu = 0.5$, $\sigma = 0.0001$, $\varsigma = 1.0$, $x_0 = 0.2$, $\ell = 1.0$, $T = 10$, $R = 0.8$, $A = 100$, $\gamma = 1.0$, $K = 1000$ y $M = 200$. En la figura 1b se muestran ejemplos de funciones adjuntas $g_j(x_0,t)$ para los instantes $t_j = 3$, $t_j = 6$ y $t_j = 10$, y los mismos parámetros empleados en el modelo directo. Note que el cálculo de dichas funciones depende de las condiciones de dispersión y transformación de los contaminantes en la atmósfera, así como de los sitios de monitoreo y emisión, sin embargo, estas funciones son independientes de la tasa de emisión $Q(t)$. Una vez calculadas las funciones adjuntas a través de la serie de Fourier-Fejér (15) es posible plantear el problema (18)-(20). Este problema se discretiza usando la fórmula del trapecio para integrales y se resuelve como un problema de programación cuadrática [7], la solución se calcula aplicando directamente la rutina *quadprog* de MATLAB. Dicha solución se conoce como *solución regularizada* Q_ε.



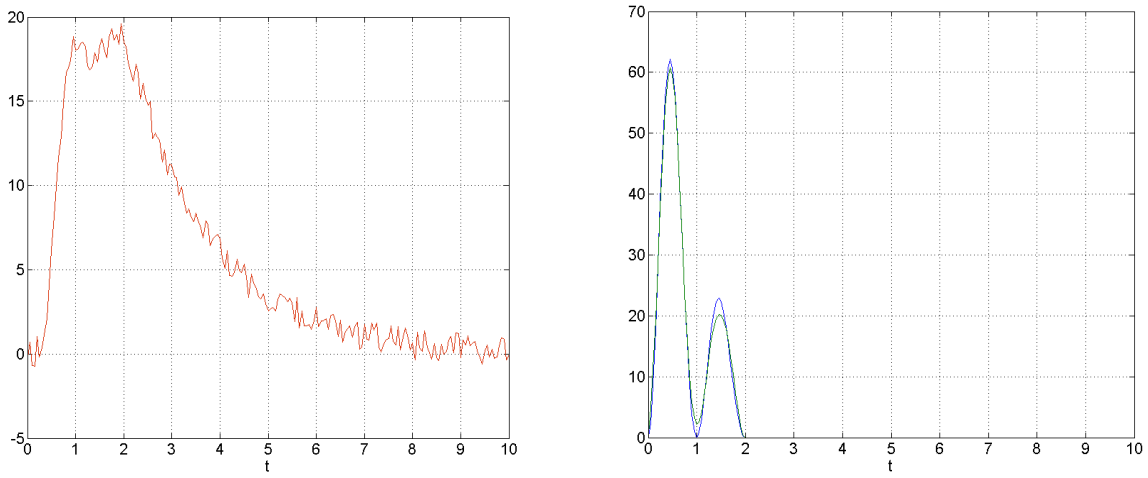
(a) (b)

Figura 1. a) Tasa de emisión de prueba $Q(t)$ *(azul) y la concentración* $\phi(R,t)$ *(rojo). b) Funciones adjuntas* $g_j(x_0,t)$ *para los instantes* $t_j = 3.0$ *(rojo),* $t_j = 6.0$ *(verde) y* $t_j = 10.0$ *(azul).*

En este ejemplo, la serie de tiempo sintética $\{\phi_j\}$ (datos de la concentración del contaminante) se genera por medio de la siguiente ecuación:

$$\phi_j = \phi(R,t_j) + \delta\phi_j, \quad t_j = j\Delta t, \quad j = 0,1,\ldots,M \tag{22}$$

donde los valores $\phi(R,t_j)$ se obtienen por medio de la serie (6), y los errores aleatorios $\{\delta\phi_j\}$ están uniformemente distribuidos en el intervalo $(-0.5,0.5)$. La amplitud de los errores fue normalizada por un factor que es el 10% del valor máximo de la función $\phi(R,t)$. La figura 2 muestra los datos ϕ_j y la solución regularizada $Q_\varepsilon(t)$ obtenida.



(a) (b)

Figura 2. a) Serie de tiempo sintética $\{\phi_j\}$ *para la concentración. b) Solución exacta* $Q(t)$ *(azul) y solución regularizada* $Q_\varepsilon(t)$ *(verde) obtenida para* $\varepsilon = \max_j\{|\delta\phi_j|\}$.

La figura 2b muestra la tasa de emisión de prueba $Q(t)$, definida por la ecuación (21), y la solución regularizada $Q_\varepsilon(t)$ que se obtiene al resolver el problema (18)-(20) para el valor del parámetro de regularización $\varepsilon = \max_j\{|\delta\phi_j|\}$. El resultado en la recuperación de la tasa de emisión es satisfactorio, ya que el error relativo de aproximación $E = \|Q_\varepsilon - Q\|_2 / \|Q\|_2$ es del 5%, donde el error relativo en los datos sintéticos de concentración es de 6%, aproximadamente. Es decir, se obtiene una solución regularizada en el mismo orden de aproximación que tienen los datos utilizados. Ejemplos numéricos bidimensionales muestran un desempeño similar del método inverso cuando se utilizan datos de la concentración del contaminante en forma de una serie de tiempo [7].

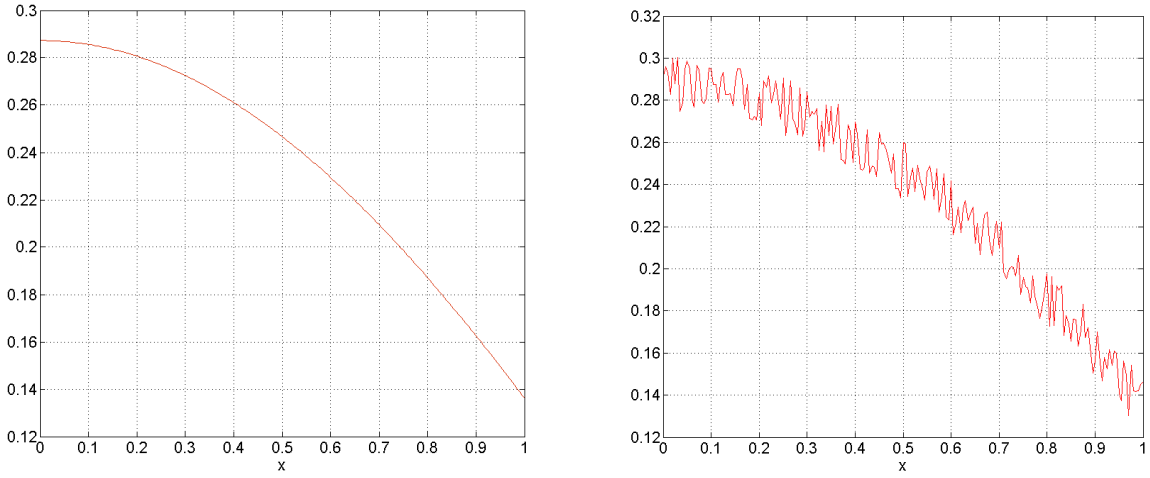
El segundo ejemplo numérico utiliza datos sintéticos espacialmente distribuidos,

$$\phi_i = \phi(R_i, T) + \delta\phi_i, \quad R_i = i\Delta x, \quad i = 1,\ldots,N \tag{23}$$

Además, para efectos de comparación con el ejemplo anterior, se considera la misma función de prueba $Q(t)$ definida por (21) y los mismos valores de los parámetros adimensionales. También, para efectos de comparación, se han elegido tantos datos ϕ_i como los considerados en la serie de

tiempo del primer ejemplo, esto con el fin de tener el mismo número de restricciones en el problema variacional. Por lo tanto, se considera que $N = 200$, $\Delta x = \ell / N = 0.05$ y $R_i = i\Delta x, \quad i = 1,\ldots,N$.

La figura 3a muestra la concentración del contaminante $\phi(x,T)$, $0 < x < \ell$, que se obtiene a través de la serie de Fourier-Fejér (6), mientras que en la figura 3b se grafican los datos sintéticos de concentración obtenidos por medio de la ecuación (23). Los valores aleatorios $\delta\phi_i$ se distribuyen uniformemente en el intervalo $(-0.5, 0.5)$. Como en el primer ejemplo, la amplitud de los errores fue normalizada por un factor que es el 10% del valor máximo de la función $\phi(x,T)$.



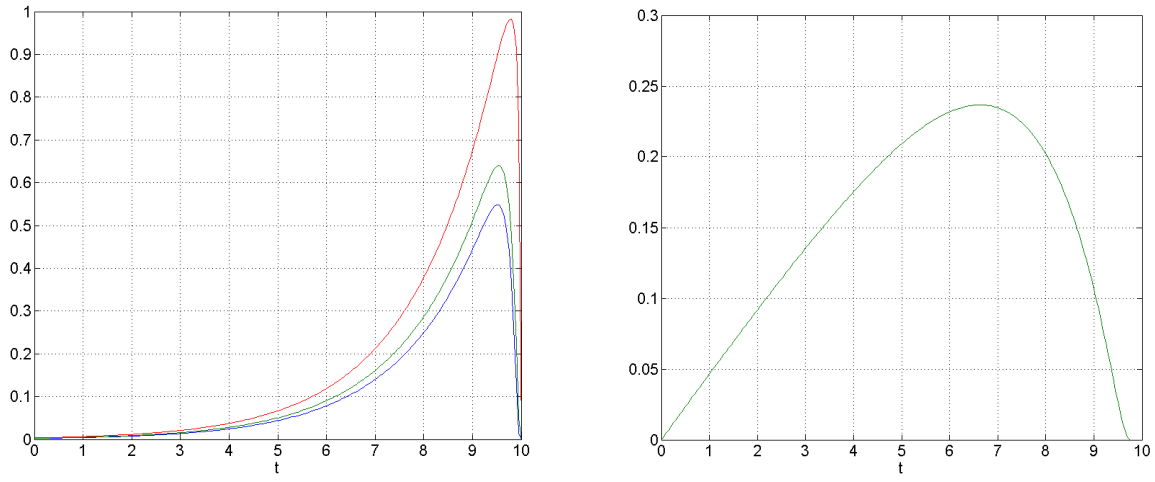
(a) (b)

Figura 3. a) Concentración $\phi(x,T)$ dada por la serie de Fourier-Fejér (6). b) Datos sintéticos para la concentración del contaminante ϕ_i, $i = 1,\ldots,N$.

La figura 4a muestra las funciones adjuntas $g_i(x_0,t)$ que corresponden a los sitios de monitoreo o nodos $R_i = 0.5,\ 0.8$ y 0.9. Note que la amplitud en cada función adjunta se incrementa conforme R_i se aproxima al punto de emisión $x_0 = 0.2$. Este efecto se debe al hecho de que la concentración de un contaminante es mayor cerca de la fuente de emisión.

Una vez calculadas todas las funciones adjuntas a través de la serie de Fourier-Fejér (15) es posible plantear el problema variacional (18)-(20) para los datos de concentración espacialmente distribuidos ϕ_i. Este problema se discretiza usando la fórmula del trapecio para integrales y se resuelve como un problema de programación cuadrática, la solución se calcula aplicando directamente la rutina *quadprog* de MATLAB. La solución de dicho problema de optimización es la

solución regularizada $Q_\varepsilon(t)$. La figura 4b muestra la solución regularizada $Q_\varepsilon(t)$ que se obtiene para $\varepsilon = \max_i \{|\delta\phi_i|\}$. Al comparar esta función con la tasa de emisión de prueba $Q(t)$, definida por (21) y trazada en la figura 1a (línea azul), se observa que el resultado es erróneo.



(a) (b)

Figura 4. a) Funciones adjuntas $g_i(x_0,t)$ para diferentes nodos R_i : línea roja, $R_i = 0.5$; línea verde, $R_i = 0.8$; y línea azul, $R_i = 0.9$. b) Solución regularizada $Q_\varepsilon(t)$ obtenida para $\varepsilon = \max_i \{|\delta\phi_i|\}$.

Las figuras 5a y 5b muestran que la tasa incorrecta de emisión $Q_\varepsilon(t)$, trazada en la figura 4b, reproduce muy bien los datos sintéticos de concentración ϕ_i y la función de concentración teórica $\phi(x,T)$. Es decir, cuando se resuelve el modelo de dispersión (1)-(4) con la tasa de emisión $Q_\varepsilon(t)$ entonces la concentración ϕ_ε que se obtiene al tiempo $t = T$ es la curva en color azul que se observa en las figuras 5a y 5b. Este resultado indica que en un problema inverso la reproducción fiel de los datos experimentales no implica necesariamente que se hayan obtenido las causas correctas que generan tales observaciones. La razón fundamental de un resultado de este tipo es la existencia de muchas causas para los efectos observados en un sistema. De aquí la importancia de seleccionar datos con la capacidad de reducir el espacio de posibles causas.

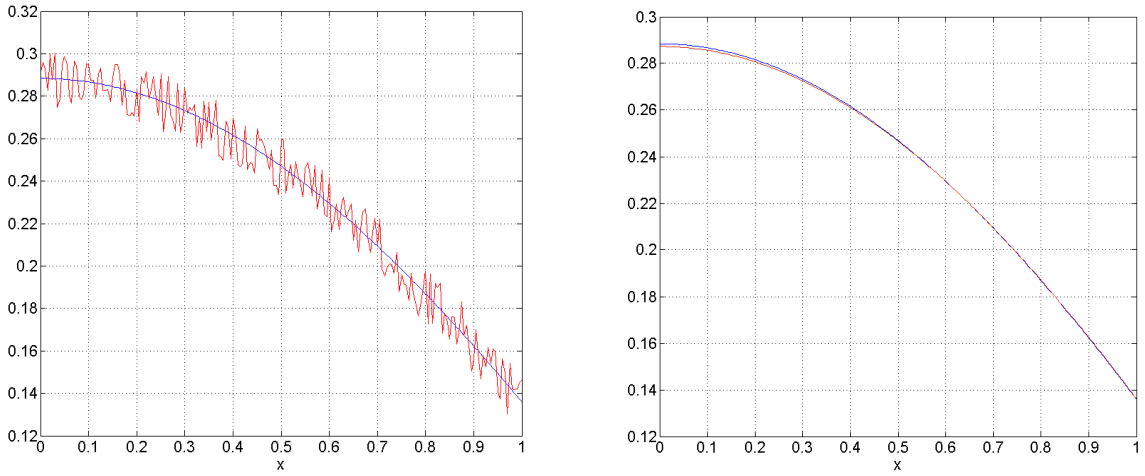


Figura 5. a) Línea azul: concentración ϕ_ε al tiempo $t = T$ obtenida con $Q_\varepsilon(t)$; línea roja: datos sintéticos ϕ_i. b) Línea azul: concentración ϕ_ε al tiempo $t = T$; línea roja: concentración exacta $\phi(x,T)$.

El hecho de que las funciones $Q_\varepsilon(t)$ y $Q(t)$ sean tan diferentes, aún cuando los datos sintéticos de la concentración ϕ_i sólo contienen un pequeño error relativo del 3.5%, radica en la limitada información útil que contienen dichos datos. Para mostrar esto, consideramos la masa total emitida por la fuente puntual, es decir, $m = \int_0^T Q(t)dt$. En el caso de la tasa $Q(t)$ definida por la ecuación (21) se tiene que $m = 42.16$. Por otra parte, la masa contenida en la función $\phi(x,T)$ se estima como $m_T = \int_0^1 \phi(x,T)\,dx$. En este ejemplo, la función $\phi(x,T)$ y los datos sintéticos ϕ_i contienen la misma masa $m_T = 0.2359$, es decir, la masa contenida en los datos representa sólo el 0.56% de la masa total emitida. Por lo tanto, los datos sintéticos ϕ_i contienen menos del 1% de la historia de emisión de la fuente. Dicho de otro modo, al instante $t = T$ el 99% de la masa emitida ha salido del domino de observación D, o se ha transformado, y no se ve representada en los datos ϕ_i. Tal incertidumbre en la información permite la existencia de muchas funciones de emisión que se ajustan a los datos sintéticos de concentración ϕ_i. La tasa $Q_\varepsilon(t)$ que determina el método de regularización es una de tales funciones.

Un segundo elemento de incertidumbre se explica a través de la siguiente ecuación que ha sido obtenida de la ecuación de balance de masa (5).

$$Q(t) = \left[\varsigma\phi(\ell,t) + \sigma\int_0^{\ell} \phi(x,t)dx \right] + \frac{\partial}{\partial t}\int_0^{\ell} \phi(x,t)dx, \ 0 < t < T \tag{24}$$

De tal ecuación es claro que la tasa de emisión depende de la razón de cambio, en cada tiempo $t < T$, de la integral de los valores espacialmente distribuidos de la concentración ϕ, proceso representado por el último término del lado derecho de la ecuación (24). Tal información no está presente en los datos sintéticos de concentración ϕ_i, ya que estos datos se obtienen sólo para el tiempo $t = T$. Como en el caso anterior, tal incertidumbre en la información permite la existencia de muchas funciones de emisión que se ajustan a los datos sintéticos de concentración.

Finalmente, note que siempre hay una reducción de la información útil sobre una fuente de emisión cuando se utilizan datos espacialmente distribuidos de la concentración de un contaminante, recabados en dominios acotados con frontera abierta, y considerando tiempos grandes en el proceso de dispersión [5].

5. Conclusiones

En este trabajo se ha presentado un método inverso para recuperar la tasa de emisión de una fuente contaminante a partir de datos de concentración. El método se puede formular tanto para una serie de tiempo de datos de la concentración de un contaminante atmosférico, como para datos de la concentración distribuidos en un dominio a un tiempo fijo. Las estimaciones del método son diferentes con respecto a estos conjuntos de datos. Se obtiene un buen resultado en la recuperación de la tasa de emisión usando series de tiempo, mientras que los datos espacialmente distribuidos no son viables para resolver el problema inverso. La razón es que los datos de concentración espacialmente distribuidos no contienen la información completa de la historia de emisión de la fuente contaminante.

6. Agradecimientos

Este trabajo fue apoyado con la becas 25170 y 14539 del Sistema Nacional de Investigadores (SNI, CONACyT, México).

7. Bibliografía

23. Aster, R. C., Borchers, B., Thurber, C. H., “Parameter estimation and inverse problems”, Academic Press, Elsevier, 2013.
24. Tikhonov, A. N., Arsenin, V. Y., “Solution of Ill-posed Problems”. Washington: Wins. & Sons, 1977.
25. Skiba, Y. N., Parra-Guevara, D., “Application of adjoint equations to problems of dispersion and control of pollutants”. New York: Nova Science Publishers, 2015.
26. Vautard, R., Beekmann, M., Menut, L., Applications of adjoint modelling in atmospheric chemistry: sensitivity and inverse modelling. Environmental Modelling and Software, Elsevier, 15, 703-709, 2000.
27. Enting, I. G., “Inverse problems in atmospheric constituent transport”. UK: Cambridge University Press, 2002.
28. Parra-Guevara, D., Skiba, Y. N., Recuperación de la tasa de emisión de una fuente contaminante: Análisis de la existencia, la unicidad y la estabilidad de las soluciones. Información Tecnológica. 27 (5), 251-262, 2016.

Parra-Guevara, D., Skiba, Y. N., Reyes-Romero, A., Existence and uniqueness of the regularized solution in the problem of recovery the non-steady emission rate of a point source: Application of the adjoint method. In: “Engineering Optimization IV”, Rodrigues, H.C., et al. (eds.), 181-186. London: CRC Press/Balkema, Taylor and Francis Group, 2015.

Metodología Bootstrap en la predicción del Índice de la Bolsa de Valores de Lima, Perú (S&P/BVL)

[1]Juan Carlos Orosco Gavilán

Universidad Privada del Norte, Lima, Perú. juan.orosco@upn.edu.pe

1. Resumen

La presente investigación es de naturaleza aplicada, y tiene el objetivo de analizar y evaluar la metodología Bootstrap en modelos heterocedásticos aplicados en la predicción del Índice de la Bolsa de Valores de Lima (S&P/BVL), periodo 2017 – 2019. A partir del algoritmo de procesos heterocedásticos GARCH con Bootstrap propuesto por Pascual[(1)] siendo esta generalizado para otros tipos de modelos heterocedásticos; fueron obtenidas las predicciones mediante la metodología paramétrica y metodología Bootstrap, que fueron comparados con valores reales y finalmente fueron evaluados los desempeños de ambas metodologías. Del estudio se obtuvo que los modelos que mejor ajustan a la serie son los modelos ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) con supuestos de los residuales con distribuciones Normal y t-Student con 5 grados de liberta. El estudio comparativo mostró que la aplicación de la metodología Bootstrap en la serie de los retornos del Índice de la Bolsa de Valores de Lima, permite obtener intervalos de predicciones con mayores e iguales amplitudes en algunos horizontes hacia adelante en comparación con la metodología paramétrica, y también permitió

[1]

construir con un buen desempeño los intervalos de predicción para las volatilidades, así, siendo esta una alternativa para la construcción de intervalos de predicción en los modelos heterocedásticos

2. Introducción

La predicción es uno de los principales objetivos en la aplicación de los modelos de series temporales, y es de interés en muchas áreas de conocimiento. En los mercados financieros, la predicción es un gran desafío para la estadística, pues la respuesta correcta a preguntas como, por ejemplo, si las acciones de la bolsa de valores van a subir, o si el valor del dólar va a caer, pueden significar un gran lucro o perjuicio para los inversores individuales o empresariales. Así también el comportamiento de los mercados bursátiles y su evolución ha despertado mucho interés en estos últimos tiempos entre los agentes económicos, ello se debe a que constituyen un medio de financiamiento de la actividad productiva de las empresas a partir del ahorro de los inversionistas.

La gran mayoría de las series de tipo financieras el supuesto de homocedasticidad resulta inadecuado, ya que a lo largo del tiempo su comportamiento no es estacionario ni en media ni en varianza, generando volatilidades altas para unos períodos y bajas para otros, siendo frecuente este tipo de cambios. Para esto se han desarrollado varios modelos, con el fin de capturar el efecto de la volatilidad, entre ellos se encuentran principalmente los modelos ARCH y GARCH, y sus extensiones como EGARCH, PGARCH, TGARCH.[(2)]

Por otra parte, las series de tipo financieras o retornos presentan características propias, llamados comúnmente hechos estilizados, una de estas y las más importante es el comportamiento no Normal de dichas series, la cual genera un problema para la estadística clásica o paramétrica. Una alternativa para solucionar el problema dada las características propias de los retornos es obtener intervalos de predicción utilizando procedimientos bootstrap, los cuales no requieren suponer una distribución a priori para los errores. Los métodos estadísticos clásicos se apoyan en modelos matemáticos de naturaleza estocástica, de tal forma que los resultados que de ellos se derivan, requieren en muchas ocasiones, desarrollos analíticos complejos, lo que ha supuesto un obstáculo para su utilización comprensiva en muchas áreas científicas, básicamente para utilizar aquellos modelos estadísticos que se ajusten a características de los datos de cada disciplina. En términos más precisos, los modelos estadísticos incorporan distintos supuestos que establecen restricciones sobre las variables aleatorias analizadas.

En la actualidad los procedimientos de remuestreo son ampliamente conocidos y utilizados en diversos campos de la investigación y se han ido incorporando como técnicas bastante habituales en el análisis e interpretación de cierto tipo de datos. El método bootstrap o técnica del remuestreo, reemplaza las derivaciones teóricas del enfoque ya dicho por la evaluación de los estadísticos en submuestras obtenidas a partir de los datos originales, y mediante estos valores se obtienen estimadores de las medidas de exactitud o de la distribución muestral del estadístico. Pascual[(1)] propusieron un método bootstrap para el cálculo de intervalos de predicción en modelos GARCH, obteniendo buenos resultados y siendo una alternativa para el cálculo de intervalos de predicción paramétrico, siendo este método generalizable a otros modelos heterocedásticos.

En este trabajo se realizó una aplicación de la metodología bootstrap a una serie temporal de tipo financiera que es el retorno del Índice de la Bolsa de Valores de Lima (S&P/BVL), comparando los resultados con la metodología paramétrica de predicción de intervalos. El índice trabajado es el de mayor representatividad dentro del mercado bursátil, que incluyen las empresas más importantes del país que cotizan en el Índice de la Bolsa de Valores de Lima.

En el Perú no existe un estudio acerca de la Bolsa de Valores de Lima para los retornos y volatilidades mediante la metodología bootstrap y a nivel mundial no es común el uso de esta metodología en la predicción de los índices bursátiles. Este estudio pretende aportar al análisis de los índices bursátiles de la Bolsa de Valores de Lima y de cualquier otra, dando una alternativa de método al estudio de predicciones en el mercado financiero.

2. Condiciones experimentales

2.1 Principio de Bootstrap

En la formulación formal del bootstrap inicialmente propuesto por Efron[3] se considera $X_1, X_2, \ldots, X_n$una secuencia de variables aleatorias i.i.d con distribución común F desconocida y de valor medio μ y de varianza σ^2 finitos, pero desconocidos.

Así, sea $(x¿¿1, x_2, \ldots, x_n)¿$ una realización de $(X¿¿1, X_2, \ldots, X_n)¿$. Una muestra $(x¿¿1, x_2, \ldots, x_n)¿$ que va a desempeñar el papel de la “población Bootstrap”, de esta se extraerán con reposición, un grande número, B, de muestras, que designamos de “muestras Bootstrap” o “remuestras Bootstrap”. El objetivo es estimar la función de distribución de la población F o algún aspecto particular de esta.

2.2 Procesos Heterocedásticos

Los procesos heterocedásticos consisten en además de modelar la media, modela la varianza de una variable dependiente en función de los valores pasados de la propia variable; el proceso más simple de heterocedasticidad es el ARCH que viene definido por dos expresiones: en la primera se modela la esperanza condicionada de la serie en función de la varianza y de un término de error, y en la segunda ecuación es la varianza condicionada la que es modelada en función de sus propios valores pasados.

Una generalización natural de los modelos ARCH, donde la varianza condicional es también función de sus propios valores desfasados, es el modelo GARCH (generalizado ARCH) sugerida por Bollerslev[4]. Así una serie y_t es llamado de proceso GARCH(p,q) si satisface las siguientes ecuaciones:

$$y_t = \sigma_t \varepsilon_t$$

$$\sigma_t^2 = \omega + \sum_{i=1}^{p} \alpha_i y_{t-i}^2 + \sum_{j=1}^{q} \beta_j \sigma_{t-j}^2$$

Donde: $\omega > 0, \alpha_i > 0 \; y \; \beta_j > 0$. ε_t, es una secuencia de variables aleatorias independientes e idénticamente distribuidas con media cero y varianza uno, e independiente de y_{t-1} para i > 1. En la práctica usualmente se supone que $\varepsilon_t \; N(0,1) o \varepsilon_t \; t_v$ (distribución t de Student con v grados de libertad).

A partir de los procesos ARCH y GARCH se planearon otros tipos de modelos con características propias como el proceso EGARCH y TGARCH que asumen que los errores positivos y negativos tienen un efecto simétrico en la volatilidad, estos modelo permiten que la volatilidad sea más afectada por retornos pasados negativos que de los positivos. Una ventaja en este modelo para garantizar la varianza positiva es la inexistencia de la restricción de que los parámetros sean positivos.[5]

En la presente investigación se obtuvo los modelos heterocedasticos de los retornos del Índice de la Bolsa de Valores de Lima (S&P/BVL), que es un indicador que mide el comportamiento del mercado bursátil y sirve para establecer comparaciones respecto de los rendimientos alcanzados por los diversos sectores participantes en la Bolsa de Valores Lima, y está conformada por un conjunto de valores que concentra el 80% de la negociación del mercado.

Una serie de retornos es definida como la diferencia de los logaritmos de una serie de tiempo financiera. Para $t = 1,2,\ldots,T$ donde T es el total número de observaciones. Los retornos diarios del índice son denotados como:

$$r_t = \ln\left(\frac{p_t}{p_{t-1}}\right)$$

y la varianza del retorno es referido como la volatilidad de r_t.

Kosapattarapim[6] menciona que los hechos estilizados de los retornos son en general propiedades de retornos financieros que son aceptados como verdaderos. Estudiados empíricamente muestran que estas propiedades son consistentes.

Los hechos estilizados relativos a retornos financieros pueden ser resumidos como:

- Los retornos son no correlacionados serialmente, o presentan en general pequeña autocorrelación.
- Los cuadrados de los retornos están autocorrelacionados.
- Series de retornos presentan conglomerados de volatilidades a lo largo del tiempo.

- La distribución (incondicional) de los retornos presenta colas más pesadas que una distribución normal, y la distribución es en general leptocúrtica (distribución no normal).
- En muchos casos, la distribución condicional también presenta colas pesadas.

2.3 Metodología aplicada al Índice S&P/BVL

Los datos fueron obtenidos del mercado bursátil de los índices históricos de la Bolsa de Valores de Lima[7], del período 2017 al 2019. La población estuvo conformada por los precios diarios de cierre de activos del mercado bursátil de la bolsa de valores de Lima, del 1 de enero del 2017 al 31 de diciembre del 2019, con un total de 781 observaciones. Las muestras fueron divididas en muestra de entrenamiento y la muestra de prueba, la primera conformada por los precios diarios de cierre de activos del mercado bursátil de la bolsa de valores de Lima, del 1 de enero del 2017 al 30 de noviembre del 2019, con un total de 761 observaciones; y la segunda conformada por los precios diarios de cierre de activos del mercado bursátil de la bolsa de valores de Lima, del 1 de diciembre del 2019 al 31 de diciembre del 2019, con un total de 20 observaciones.

Cada modelo obtenido fue calculado a partir de los datos de entrenamiento, y para poder realizar las evaluaciones respecto a la predicción en cada modelo, se realizó la comparación con los datos de prueba.

Los pasos que se realizaron para poder cumplir con los objetivos de la presente investigación fueron los propuestos por Box y Jenkins[8], que consiste en el análisis exploratorio, identificación de modelos, estimación, diagnóstico del modelo, y finalmente la predicción. Una vez determinado el mejor modelo se realizaron las predicciones paramétricas y bootstrap. Este proceso se detallada de manera resumida en los siguientes pasos:

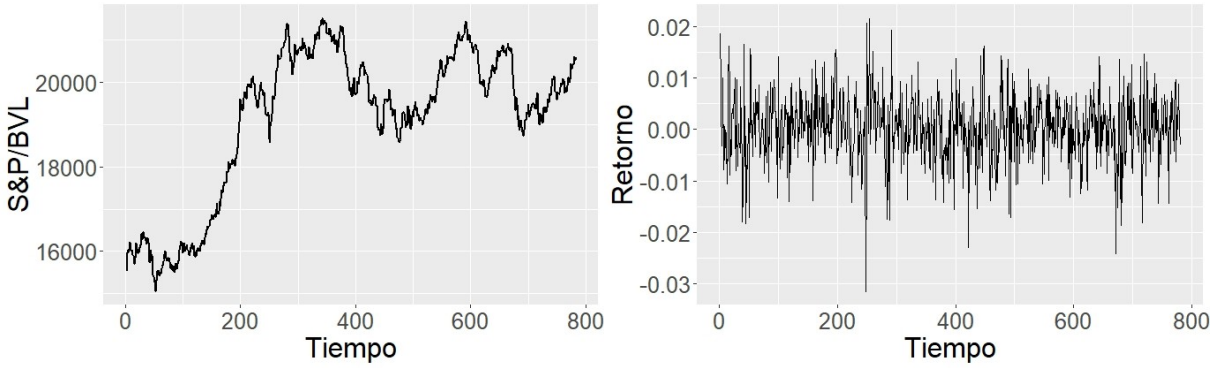
- Las predicciones para los retornos y las volatilidades fueron calculadas para el mes de diciembre del 2019 con un total de 20 observaciones, y_{t+k}, con $k=1,2,\ldots,20$.
- Los intervalos de predicción fueron calculados en los niveles de confianza del 90% y 95%.
- Para los intervalos de predicción bootstrap se consideraron muestras bootstrap de tamaño B=3000.
- Para los intervalos de predicción paramétricos se asumió que los residuales ε_t provienen de una distribución Normal con media cero y varianza 1, y distribución t de Student con 5 grados de libertad.
- Para evaluar los intervalos de predicción bootstrap e intervalos de predicción paramétrico para los retornos, fueron evaluados sus coberturas respecto a sus valores verdaderos del mes de diciembre 2019 y sus amplitudes de intervalos. Estas evaluaciones fueron realizadas a partir de los gráficos de series y sus respectivos intervalos de predicción.
- Para los intervalos de predicción de las volatilidades, se consideraron como las volatilidades reales a las volatilidades estimadas por los modelos.

Se uso el *software R* con los paquetes *rugarch, forecast, tseries, timeSeries y ggplot2* para obtener los pronósticos y la realización de las gráficas.

3. Resultados y discusión

3.1 Análisis exploratorio

De la figura 1(a) de los índices de precios, se observaron la presencia de alzas significativas durante los últimos seis meses del año 2017 y caídas y alzas inesperadas en el 2018 y 2019. En la evolución de los retornos de la figura 1(b) la evolución de los retornos r_t se observaron agrupamientos de las volatilidades a lo largo del tiempo, las cuales hacen referencia a las oscilaciones que presentan sus cotizaciones, y también que no presenta evidencia de no estacionariedad, por la prueba de raíz unitaria de Dickey y Fuller con valor del estadístico $\tau = -24.563$y de probabilidad $p = 0{,}000$, rechazando la hipótesis de existencia de raíces unitarias en la serie, es decir, la serie de retornos r_t es estacionaria.



(a) (b)

Figura 1: (a) Evolución diaria de los precios de cierre y (b) Evolución de los retornos diarios de los precios de cierre, del Índice S&P/BVL del 1 de enero de 2017 al 31 de diciembre de 2019.

De la figura 2, se observó que los retornos se encuentran alrededor de cero, y la presencia de valores apartados de la parte central de las distribuciones, es decir, colas pesadas o largas. El coeficiente de asimetría con valor $s = -0.3246$, indicando que las distribuciones de los retornos de la media está sesgada ligeramente hacia la izquierda, el coeficiente de curtosis con valor $k = 4.3024 > 3$, indicando que los retornos siguen una distribución leptocúrtica, dando indicios de los hechos estilizados presentes en el retorno del Índice S&P/GVL.

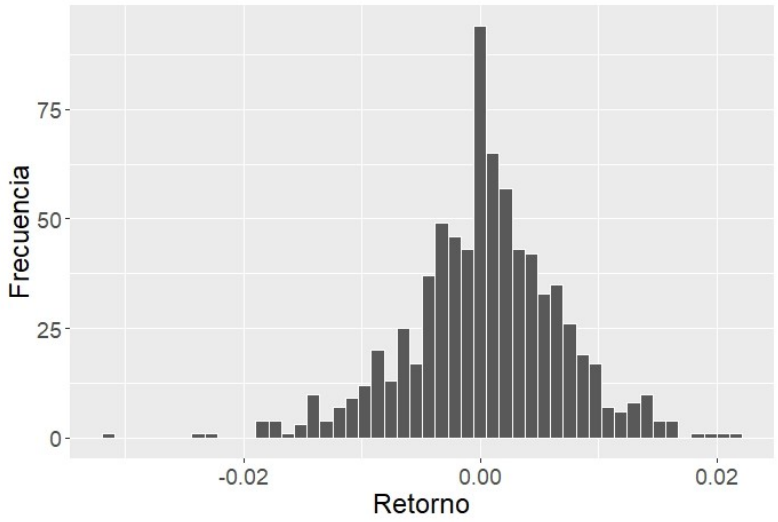


Figura 2: Histograma de frecuencias de los retornos diarios de los precios de cierre del S&P/BVL de 1 de enero de 2017 al 31 de diciembre de 2019.

Se observó mediante la prueba de autocorrelación de Ljung y Box, que la serie de retornos r_t con valores de estadístico Q grandes y de probabilidad menores a cero para todos los rezagos y a un nivel de significación de 0,05, la existencia de correlación serial, por tanto fue necesario la construcción de un modelo ARMA(p,q) para remover dicha correlación, se obtuvo que el modelo apropiado para r_t es un ARMA(1,0), definido por:

$$r_t = \phi_1 r_{t-1} + + b_t$$

Donde: b_t es el residuo del modelo.

Por la prueba de autocorrelación de Ljung y Box para b_t, se obtuvo que con valores del estadístico Q y de probabilidad p los niveles de rezagos 1, 2, 3, 5, 10 y 20, con un nivel de significación de 0,01, no se rechaza la hipótesis nula de no correlación de los residuos, de este modo se eliminó la correlación serial para r_t. Para observar si r_t presenta heterocedasticidad condicional se analizó la serie b_t^2, mediante la prueba de autocorrelación para b_t^2 de Ljung y Box, con valores del estadístico Q y de probabilidad p en todos los niveles de rezagos 1, 2, 3, 5, 10 y 20, con un nivel de significación del 0,01 se rechazó la hipótesis de existencia de autocorrelación para b_t^2, es decir se observó la presencia de heterocedasticidad condicional en b_t, justificando así el modelamiento por un proceso heterocedástico.

3.2 Identificación de modelos

Se determinó que el mejor ajuste para la serie viene dado por el modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) con distribuciones para sus residuales Normal y t-Student, con valores de criterios de informaciones menores a los demás modelos, y considerando el modelo más parsimonioso.

3.3 Estimación

Se observó que en el modelo ajustado, todos los parámetros estimados son significativos a un nivel de confianza del 90%, los valores de la estimación del modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) a la serie de retornos y su volatilidad son presentados por las siguientes ecuaciones.

Suponiendo que $\varepsilon_t \ \ N(0,1)$ se tiene

$$r_t = 0.1283\, r_{t-1} + b_t$$

$$\log\left(\sigma_t^2\right) = 16.825 - 0.099\,\varepsilon_{t-1} - 0.143\left[\left|\varepsilon_{t-1}\right| - E\left(\left|\varepsilon_{t-1}\right|\right)\right] - 0.736\log\left(\sigma_{t-1}^2\right)$$

Suponiendo que $\varepsilon_t \ \ t(5)$ se tiene

$$r_t = 0.1283\, r_{t-1} + b_t$$

$$\log\left(\sigma_t^2\right) = 16.446 - 0{,}054\,\varepsilon_{t-1} - 0{,}154\left[\left|\varepsilon_{t-1}\right| - E\left(\left|\varepsilon_{t-1}\right|\right)\right] - 0.696\log\left(\sigma_{t-1}^2\right)$$

3.4 Diagnóstico

Evaluando los residuales de los modelos ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) con $\varepsilon_t \ \ N(0,1)$ y $\varepsilon_t \ \ t(5)$ se determinó la no correlación serial en los residuos y residuos al cuadrado, indicando que los modelos para la media y la varianza son adecuados. Así también, se observó que los residuales del modelo presentan un coeficiente de curtosis mayor a tres y la presencia de colas pesadas diferenciándose con un comportamiento normal estándar o t-student, sin embargo, se observó también que considerando a los residuales como una distribución t-Student con 5 grados de libertad es posible capturar el efecto de colas pesadas en el modelo. Así se determinó que el modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) con $\varepsilon_t \ \ t(5)$ presenta mejor comportamiento en comparación de ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) con $\varepsilon_t \ \ N(0,1)$. Esto de acuerdo a sus criterios de información calculados (AIC y BIC).

3.5 Predicción

En la Figura 3 se muestran los intervalos de predicción bootstrap y paramétrico para el modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) de los retornos del Índice S&P/BVL, a un nivel de confianza del 90% se observaron que los límites de predicción para los retornos con ambas metodologías no cubren todos los valores reales, específicamente en los horizontes h=7,9 y 12, y también mediante la metodología

bootstrap se observó que presentan similares amplitudes y mayores amplitudes en algunos horizontes respecto a los intervalos paramétricos en ambos supuestos de los residuales. A un nivel de confianza del 95%, se observó que los límites de predicción para los retornos con ambas metodologías no cubren todos los valores reales en los horizontes h=9 y 12 y mediante la metodología bootstrap se observaron que presentan mayores amplitudes en la mayoría de los horizontes, respecto a los intervalos bootstrap, esto en cada supuestos de los residuales.

En la Figura 4 se observó que los intervalos de predicción para las volatilidades del modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) a niveles de confianza del 90% y 95% cubren todos los valores reales de las volatilidades, y con el modelo con $\varepsilon_t \ \ t(5)$ se observó que presentan ligeramente mayores amplitudes en la mayoría de los horizontes de intervalo de predicción para las volatilidades de los retornos.

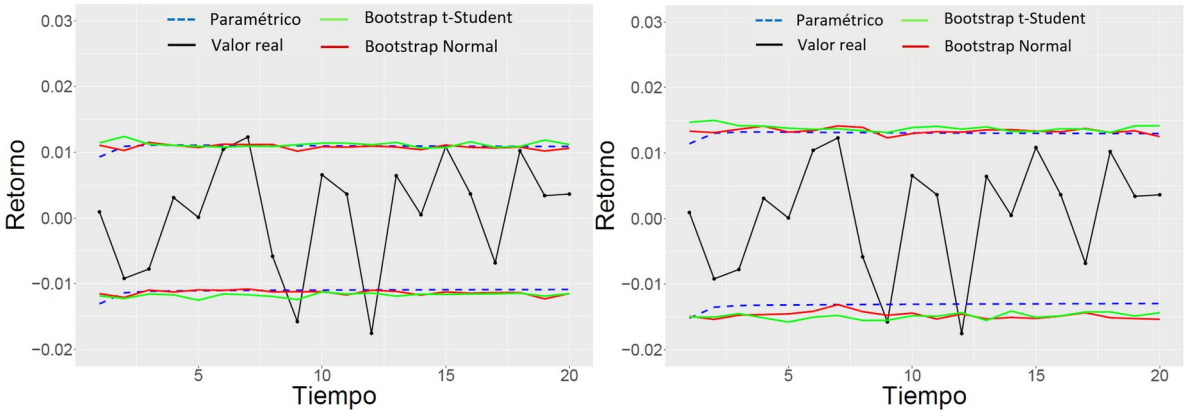
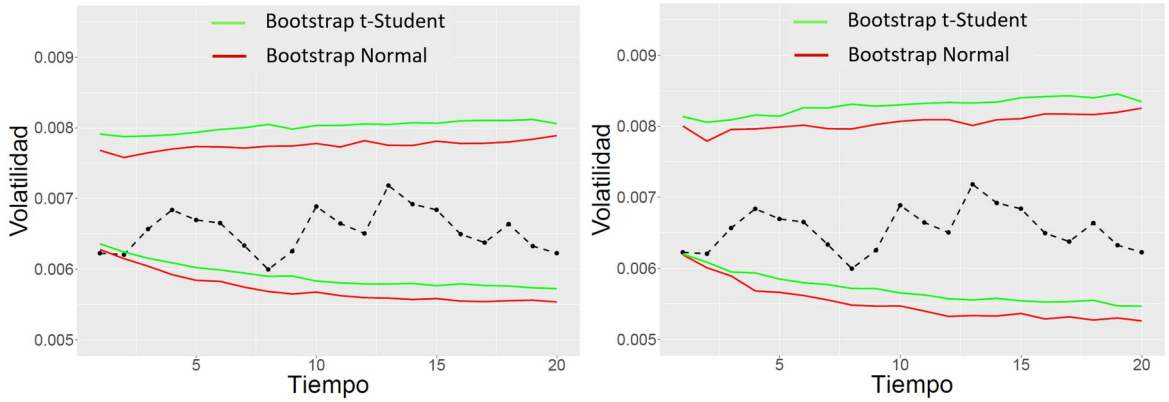


Figura 3: Intervalos de predicción al nivel de confianza del 90% (a) y 95% (b) del modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) con $\varepsilon_t \ \ N(0,1)$ y $\varepsilon_t \ \ t(5)$, de los retornos de los precios de las acciones del Índice S&P/BVL, mediante las metodologías bootstrap y paramétrico para el mes de diciembre del 2019.



(a) (b)

Figura 4: Intervalos de predicción al nivel de confianza del 90% (a) y 95% (b) del modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1) con $\varepsilon_t \sim N(0,1)$ *y* $\varepsilon_t \sim t(5)$*, de las volatilidades de los retornos de los precios de las acciones del Índice S&P/BVL, mediante las metodologías bootstrap y paramétrico para el mes de dicembre del 2019.*

4. Conclusiones

El orden de los modelos de predicción que se ajustan adecuadamente a los retornos diarios de los precios del Índice S&P/BVL fue el modelo ARMA(1,0)-EGARCH(1,1), Obteniendo mejores resultados con el supuesto de distribución de tipo t-student con 5 grados de libertad de los residuales en cada modelo.

Comparando sus coberturas de intervalos de predicción, se obtuvieron que los intervalos de predicción con niveles de confianza del 90% y 95% de los modelos para los retornos con residuales normales estándar y t-student con 5 grados de libertad, mediante las metodologías bootstrap no difieren sustancialmente de la metodología paramétrica. Son adecuadas en el sentido que presentaron un conjunto de valores entorno a sus verdaderos valores.

Comparando sus amplitudes en intervalos de predicción para los retornos con niveles de confianza del 90%y 95%, se determinaron que los intervalos mediante la metodología bootstrap se desempeñan adecuadamente, obteniendo intervalos de predicción de amplitudes mayores en algunos horizontes respecto a los intervalos paramétricos. De esta manera estableciendo una alternativa para el cálculo de los intervalos de predicción para los retornos del Índice S&P/BVL.

Considerando que no existe un método paramétrico para el cálculo de intervalos de predicción para las volatilidades de los retornos. Los intervalos de predicción mediante la metodología bootstrap para las volatilidades de los retornos presentaron comportamientos satisfactorios, con respecto a que presentaron sus valores reales de las volatilidades de los retornos dentro de los márgenes de confianza.

5. Bibliografía

1. Pascual, L., Romo, J. y Ruiz, E., Bootstrap prediction for return and volatilities in garch models. Computational Statistics and Data Analysis, 50(9), 2293-2312 (2006).
2. Horacio F., Egarch: un modelo asimétrico para estimar la volatilidad de series financieras. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 9, 49-60 (2009)
3. Efron, B. y Tibshirani, R., “An introduction to the bootstrap”. New York, Chapman and Hall, 1993.
4. Bollerslev, T., Generalized autoregressive conditional heteroskedasticity. Journal of Econometrics, 31, 307-327 (1986).
5. Morettin, P. A. y Toloi, C. M., “Análise de séries temporais”. São Paulo, Brasil: Bloucher, 2011.

6. Kosapattarapim, C., Improving volatility forescasting of garch models: applications to daily returns in emerging stock markets. Doc. Ph. School of Mathematics and Applied Statistics, University of Wollongong, 2013
7. Bolsa de Valores de Lima. Disponible en: http://www.bvl.com.pe/
8. Box, G. y Jenkins, G., “Time series analysis: Forecasting and control”. San Francisco: Holden-Day, 1970.

Determinación del potencial para la producción de microalgas en México, mediante el uso de modelos en un SIG

DE LEÓN-MATA G.D.[1], BETANCOURT-GALVÁN J.F.[2] y LOZANO-GARCÍA D.F.[3]

[1] Licenciatura en Biología–Ciencias Básicas / Profesor-Investigador. Tecnológico Nacional de México, Campus Valle del Guadiana. daniel.lm@vguadiana.tecnm.mx

[2] Centro del agua / Especialista de investigación. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). francisco_betancourt@tec.mx

[3] Escuela de Ingeniería y Ciencias / Profesor Asociado. Instituto Tecnológico y de Estudios Superiores de Monterrey (ITESM). dflozano@tec.mx

1. Resumen

El propósito de este estudio fue identificar las mejores ubicaciones para la construcción a una escala comercial de microalgas para la producción de biocombustible en México. La disminución en la disponibilidad de los combustibles fósiles junto con una creciente demanda mundial de energía, ha abierto el camino para el desarrollo de los biocombustibles. El método empleado en el SIG fue una suma ponderada donde se obtuvieron tres mapas de aptitud para el país y un mapa con valores continuos en fracción donde pixeles cercanos al 1 son altamente viables para el cultivo de microalgas. Las zonas más aptas están situadas en la costa del Golfo de México, los estados de Veracruz y Tabasco. En la parte centro también hay gran potencial, mientras que para el Norte existen menos áreas con aptitud aceptable para la implementación de estos sistemas de cultivo.

2. Introducción

El desarrollo de tecnologías enfocadas al cuidado del medio ambiente, la reutilización de los residuos y la generación de energías limpias de bajo costo se ha vuelto indispensable. En la

actualidad ya se conocen nuevas fuentes de energía alterna que no requieren ni producen compuestos contaminantes en su uso o elaboración, los biocombustibles son un claro ejemplo de energía renovable. El término biocombustible es empleado para cualquier combustible sólido, líquido o gaseoso que es producido principalmente por materia prima biorenovable. El biodiésel y el bioetanol son los principales biocombustibles que pueden remplazar al diésel y la gasolina en los vehículos de combustión interna haciendo ligeras modificaciones en su sistema[1].

Los biocombustibles pueden ser clasificados por el tipo de tecnología que implica su producción y por la biomasa utilizada como materia prima: biocombustibles de primera generación FBG's (por sus siglas en inglés), biocombustibles de segunda generación (SBG's), biocombustibles de tercera generación (TBG's) y los biocombustibles de cuarta generación (FoBG's). Los FBG's son producidos a partir de azúcar, almidón, aceites vegetales, grasa animal, mientras que los SBG´s provienen de cultivos no alimentarios como paja de trigo, maíz y madera. Los combustibles a partir de las algas, también llamados aceites algales, están clasificados como TGB's, por último están los FoBG's que incluyen cultivos genéticamente modificados para aumentar la captación de CO2 de la atmósfera y al mismo tiempo reutilizar el CO2 que se produce en la combustión del mismo biocombustible[2].

Los cultivos de microalgas son una gran oportunidad de desarrollo sustentable, al ser considerados eco-amigables ya que reciclan eficientemente contaminantes desde medios líquidos y gaseosos[3, 4, 5, 6], incorporándolos a su metabolismo para generación de biomasa[7]. En el presente trabajo se determinaron las zonas potenciales a nivel nacional con factibilidad para la producción de biodiesel a partir sistemas de cultivo de algas, mediante el desarrollo de un modelo utilizando un Sistema de Información Geográfica.

3. Condiciones experimentales

Para la estructuración del modelo se inició con la caracterización nacional considerando los siguientes temas: Geografía y extensión territorial, Relieve, Clima, Hidrología, Usos de suelo y vegetación, Demografía y aspectos culturales.

3.1 Datos geoespaciales habilitadores

En la Tabla 1 se muestran archivos de donde se contemplaron los atributos habilitadores para la implementación de los sistemas de cultivo algal, la fuente de donde provienen, una breve descripción y la ponderación que se utilizó para los procesamientos. La ponderación escrita en la tabla con valores del 1 al 5 evalúa la viabilidad de cada parámetro, donde 5 es el valor más viable y 1 tiende a ser el menos viable (el valor de cero es descartable, es decir no cuenta con valor).

Tabla 1. Datos geoespaciales habilitadores

Archivo	Fuente	Descripción	Ponderación	
Modelo Digital de Elevación (MDE)	Instituto Nacional de Estadistica y Geografía (INEGI)	Archivo en formato ráster con información de elevación en metros sobre el nivel del mar en pixeles con resolución de 100 x 100 m.	No aplica	
Pendiente	Obtenido a partir del MDE (INEGI).	Archivo ráster obtenido con la herramienta "slope" del software Arcmap, contiene los valores en porcentaje de pendiente del terreno.	Valor de pendiente	Evaluación
			≤5% >5%	5 0
Temperatura Media Anual	WorldClim. Global Climate Data	Archivo en formato ráster con información de temperatura media anual (°C x10) del territorio mexicano con una resolución de pixel de 0.93 x 0.93 km.	Rango °C	Evaluación
			27.01-29.5 23.01-26.0 20.01-23.0 17.01-20.0 15.0-17.0 <15.0	5 4 3 2 1 0
Cuerpos y corrientes de agua	INEGI	Archivos en formato shapefile en donde se contemplan los cuerpos de agua en forma de polígonos al igual que los océanos de México y las corrientes perenes en forma de polilínea.	Cercanía (m)	Evaluación
			1000 2000 3000 4000 5000	5 4 3 2 1
Pozos	INEGI	Archivo shapefile de puntos, con la ubicación espacial de los pozos de extracción de agua en el país.	Cercanía (m)	Evaluación
			1000 2000 3000 4000 5000	5 4 3 2 1
Radiación Solar	El archivo se obtuvo a partir de la base de datos de "*Surface meteorology Avarage and Solar Energy*" (SSE) de la NASA.	Archivo ráster obtenido por interpolación kriging/co-kriging a partir de la información de los datos de puntos regionales en unidades de kWh/m^2.dia (resolución de pixel = 100 x 100 m).	Rango (kWh/m2.dia)	Evaluación
			5.9001-6.27 5.6001-5.90 5.3001-5.60 4.8001-5.30 4.53-4.80	5 4 3 2 1
Evaporación	Archivo obtenido a partir de datos registrados por las estaciones climatológicas del Servicio Meteorológico Nacional (SMN).	Archivo ráster obtenido por interpolación kriging/co-kriging con los datos registrados de evaporaciones mensuales de cada año reportado por las estaciones meteorológicas de México (resolución del pixel 100 x 100 m).	Rango (mm)	Evaluación
			1085-1400 1400.1-1715 1715.1-2030 2030.1-2350 2350.1-2660	5 4 3 2 1
Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales (PTAR´s)	Comisión Nacional del Agua (CNA).	Archivo shapefile de puntos con la ubicación de las PTAR´s con registros hasta el año 2014.	Cercanía (m)	Evaluación
			1000 2000 3000 4000 5000	5 4 3 2 1
Carreteras y caminos	Secretaría de Comunicaciones y Transportes (SCT)	Archivo shapefile de polilíneas que representan los caminos y carreteras nacionales.	Cercanía (m)	Evaluación
			1000 2000 3000 4000 5000	5 4 3 2 1
Fuentes fijas de CO_2	Comisión Federal de Electricidad CFE	Archivo shapefile de puntos que ubican las diferentes fuentes de CO^2 en México y sus emisiones en toneladas (generado en el año 2012).	Cercanía (m)	Evaluación
			1000 2000 3000 4000 5000	5 4 3 2 1

3.2 Datos geoespaciales restrictivos

Existen zonas en donde no se permite el desarrollo de actividades productivas ya sea por política ambiental como por ejemplo las Áreas Naturales Protegidas (ANP's), sitios Ramsar y para evitar conflictos entre los sectores con el uso de suelo y vegetación; o simplemente porque no son físicamente factibles como la construcción sobre cuerpos y corrientes de agua, fallas geológicas, zonas urbanas, aeropuertos, etc. En la Tabla 2 se muestran los archivos que marcan restricciones en el área de estudio y en algunos casos donde se recurre a un radio restrictivo sobre el área.

Tabla 2. Datos geoespaciales con restricciones

Archivo	Fuente	Descripción	Exclusión
ANP's	Comisión Nacional para el Conocimiento y Uso de la Biodiversidad (CONABIO).	Archivo shapefile de polígonos que representan las áreas Naturales Protegidas	Excluir el área delimitada
Sitios Ramsar	CONABIO	Archivo shapefile de polígonos que representa los humedales clasificados como sitios Ramsar.	Excluir el área delimitada
Uso de Suelo y Vegetación	CONABIO	Archivo shapefile de polígonos con unidades destinadas al Uso de Suelo y Vegetación existente.	Excluir las áreas con vegetación primaria, asentamientos humanos, zonas urbanas, y algunas áreas destinadas al sector agrícola como agricultura permanente, de riego y temporal permanente.
Cuerpos y corrientes de agua (presas, lagunas y ríos)	INEGI	Archivos shapefile con los polígonos que representan los cuerpos de agua y polilíneas que representan las corrientes de agua (perenes e intermitentes).	Excluir las áreas delimitadas con un radio de exclusión de 100 m.
Localidades rurales	INEGI	Archivo shapefile de puntos con la información del Censo levantado en el 2010 por INEGI, en donde están contempladas solamente las localidades con poblaciones menores a los 2500 habitantes.	Para las localidades rurales se contempló un radio de restricción según su población. Población (habitantes) / Radio (m) <500 / 500 500-1000 / 1000 1001-1500 / 1500 1501-2000 / 2000 2001-2500 / 2500
Manchas urbanas	INEGI	Archivo shapefile con los polígonos de los sitios urbanos en el territorio.	Según la población, se determinó el radio de restricción. Población (habitantes) / Radio (m) 2,500-5,000 / 500 5,001-20,0000 / 1000 200,001-500,000 / 1500 500,001-800,000 / 2000 >800,000 / 2500
Aeropuertos	INEGI	Archivo shapefile con los polígonos de los aeropuertos ubicados en la república mexicana.	Un radio de 5 km de exclusión para evitar interferencia con los servicios aéreos.
Sitios históricos y culturales	UNESCO	Archivo shapefile de polígonos con los sitios históricos y patrimonios clasificados por la UNESCO.	Radio restrictivo de 100m sobre el área delimitada.
Fallas geológicas	Cartas geológicas de INEGI	Archivo shapefile de polilíneas de las fallas geológicas en México.	Radio restrictivo de 100 m para evitar el movimiento de la falla geológica.

3.3 Procesamientos

3.3.1 Proyección de coordenadas

Las fuentes de información manejan diferentes sistemas de coordenadas al momento de generar un archivo shapefile o un archivo ráster, por ello es importante proyectar a un mismo sistema de coordenadas para que todas las capas involucradas estén homogenizadas para el modelo. El sistema Lambert Conformal Conic fue el sistema de coordenadas al que todas las capas se proyectaron, esto ayuda a obtener buenos resultados durante el proceso de modelaje debido a que abarca la extensión territorial completa del país y facilita la asignación de distancias por las unidades que maneja (metros).

3.3.2 Creación de contornos de proximidad (buffers)

Tanto para las restricciones como para las capas habilitadoras es necesario crear contornos de su área para establecer distancias viables o restrictivas para la construcción de los sistemas de cultivo.

3.3.3 Unión de archivos Shapefile según sus atributos

Una vez creados los contornos, se procedió con el procesamiento unión de aquellas capas que representan el mismo atributo en el modelo, por ejemplo, para el atributo agua, se realizó la unión de las capas de océano, cuerpos de agua y corrientes perenes. En esta parte se asignaron los valores del 1 al 5 a los anillos de distancia. Una vez realizada la unión con los mismos atributos se realizó nuevamente una unión ahora con el territorio mexicano asignando en un campo valores de sus polígonos iguales a cero para tener información de los pixeles en toda la república.

3.3.4 Transformación de archivos shapefile a ráster

Ya que se obtuvieron capas ponderadas a partir de las uniones, se prosiguió con la transformación de archivos shapefile a un formato ráster con una resolución por pixel de 100m x 100m y con el valor asignado en la ponderación.

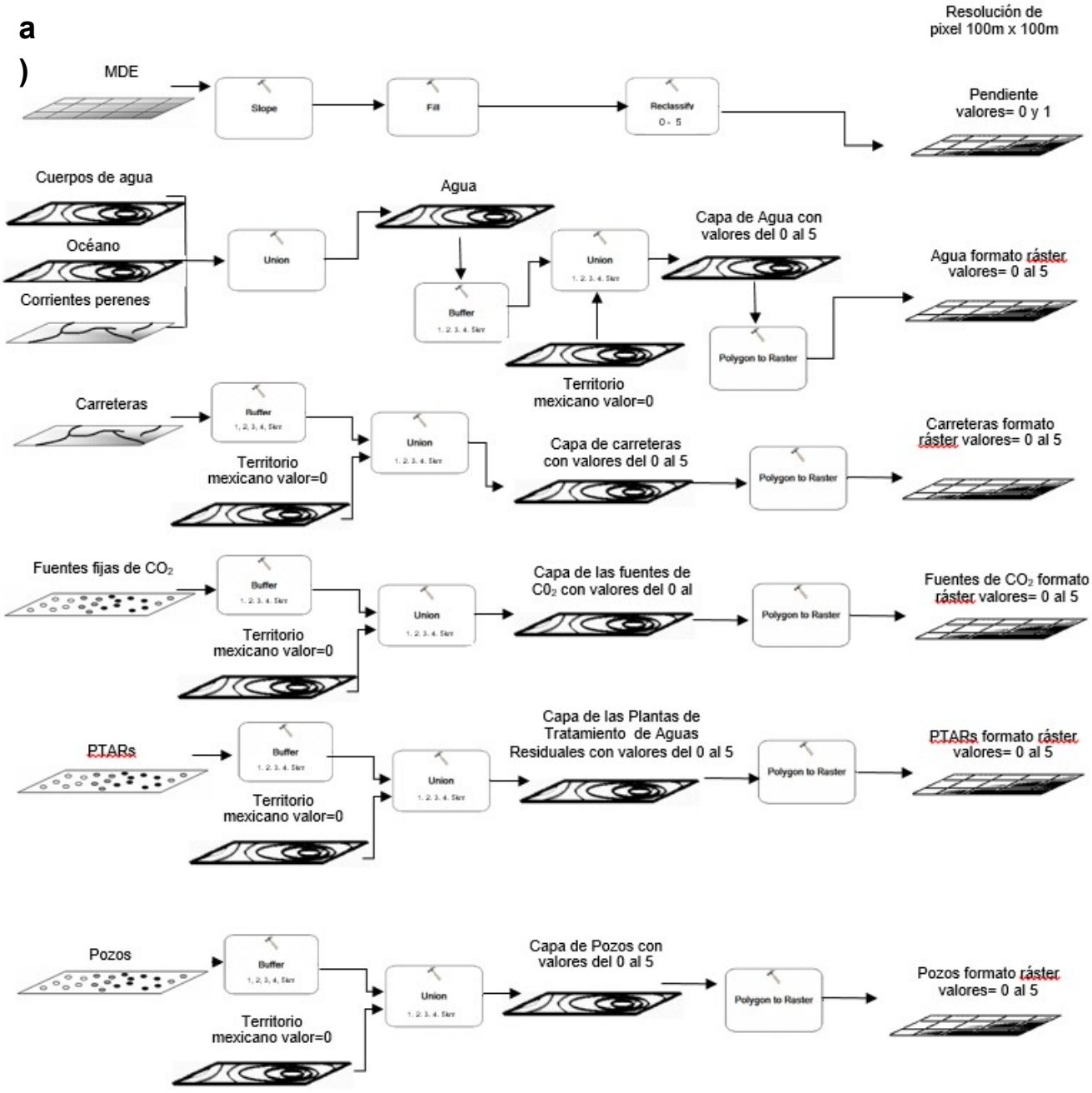
3.3.5 Reclasificación de valores en archivos ráster.

Los archivos ráster de temperatura, evaporación, radiación solar y pendiente se reclasificaron con los intervalos presentados en la Tabla 1, por lo que los valores de sus pixeles solo quedaron comprendidos del 0 al 5. En el caso de la temperatura se asignó el valor de cero a todo los pixeles con temperaturas inferiores a los 15°C; y para la pendiente solo se reclasificó con valores de cero y cinco, donde cero representa aquellos pixeles con pendiente superior al 5% y el valor de cinco representa aquellos pixeles con valores inferiores o iguales al 5%.

3.3.6 Modelo

En la Figura 1 se muestra el diagrama donde se ilustra el modelo que se empleó para obtener la capa o el mapa de las zonas viables para la construcción de los sistemas de cultivo algal en el territorio mexicano.

a)


Resolución de pixel 100m x 100m
MDE
Slope
Fill
Reclassify 0 - 5
Pendiente valores= 0 y 1
Cuerpos de agua
Océano
Corrientes perenes
Union
Agua
Buffer
Union
Capa de Agua con valores del 0 al 5
Polygon to Raster
Agua formato ráster valores= 0 al 5
Territorio mexicano valor=0
Carreteras
Buffer
Territorio mexicano valor=0
Union
Capa de carreteras con valores del 0 al 5
Polygon to Raster
Carreteras formato ráster valores= 0 al 5
Fuentes fijas de CO_2
Buffer
Territorio mexicano valor=0
Union
Capa de las fuentes de CO_2 con valores del 0 al
Polygon to Raster
Fuentes de CO_2 formato ráster valores= 0 al 5
PTARs
Buffer
Territorio mexicano valor=0
Union
Capa de las Plantas de Tratamiento de Aguas Residuales con valores del 0 al 5
Polygon to Raster
PTARs formato ráster valores= 0 al 5
Pozos
Buffer
Territorio mexicano valor=0
Union
Capa de Pozos con valores del 0 al 5
Polygon to Raster
Pozos formato ráster valores= 0 al 5

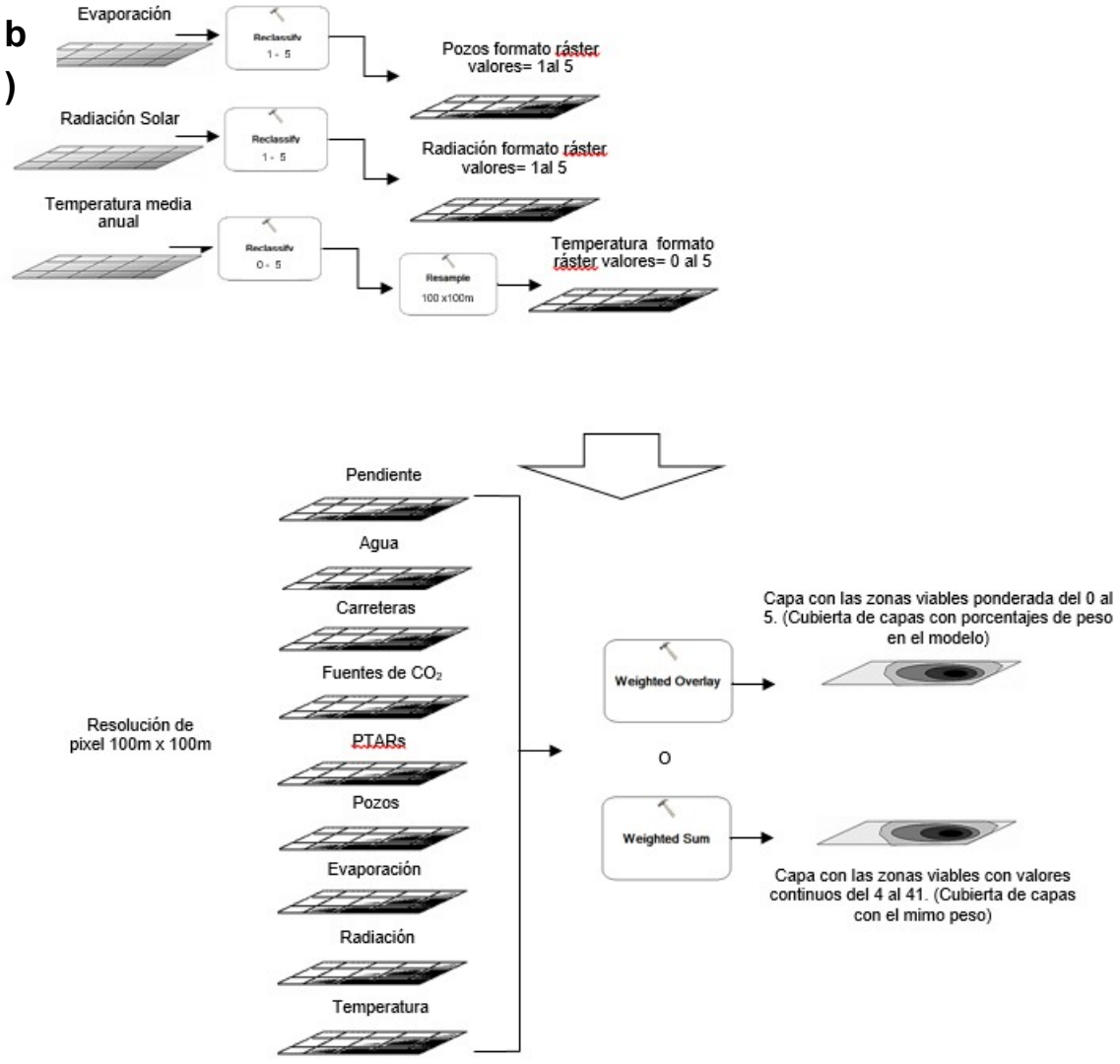
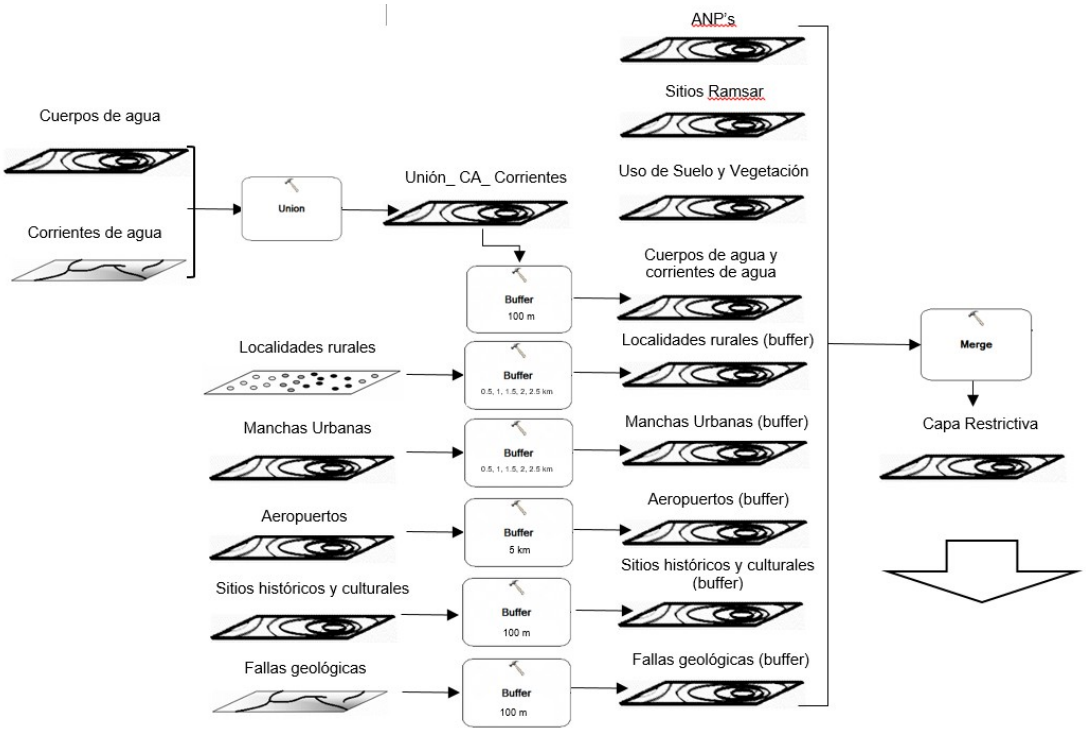


Figura 1. Diagrama (sección a y b) donde se esquematiza el modelo para obtener el mapa de las zonas viables para la construcción de los sistemas de cultivo algal en el territorio mexicano.

Existen dos herramientas en el software ArcMap que se utilizan en modelos con capas ráster, en este caso es la suma ponderada. *Weigthed Overlay* permite asignar valores de porcentaje en el peso de influencia de cada capa involucrada en el modelo, mientras que *Weigthed* sum solo realiza la suma de los valores de los pixeles considerando que todas las capas tienen el mismo peso de influencia en el modelo.

3.3.7 Aplicación de las restricciones al modelo

La participación de las capas restrictivas se realizó al final del modelo, en la Figura 2 se muestra el diagrama donde se describe la obtención de la capa restrictiva y cómo se obtuvo solamente el área hábil para la construcción de los sistemas de cultivo.



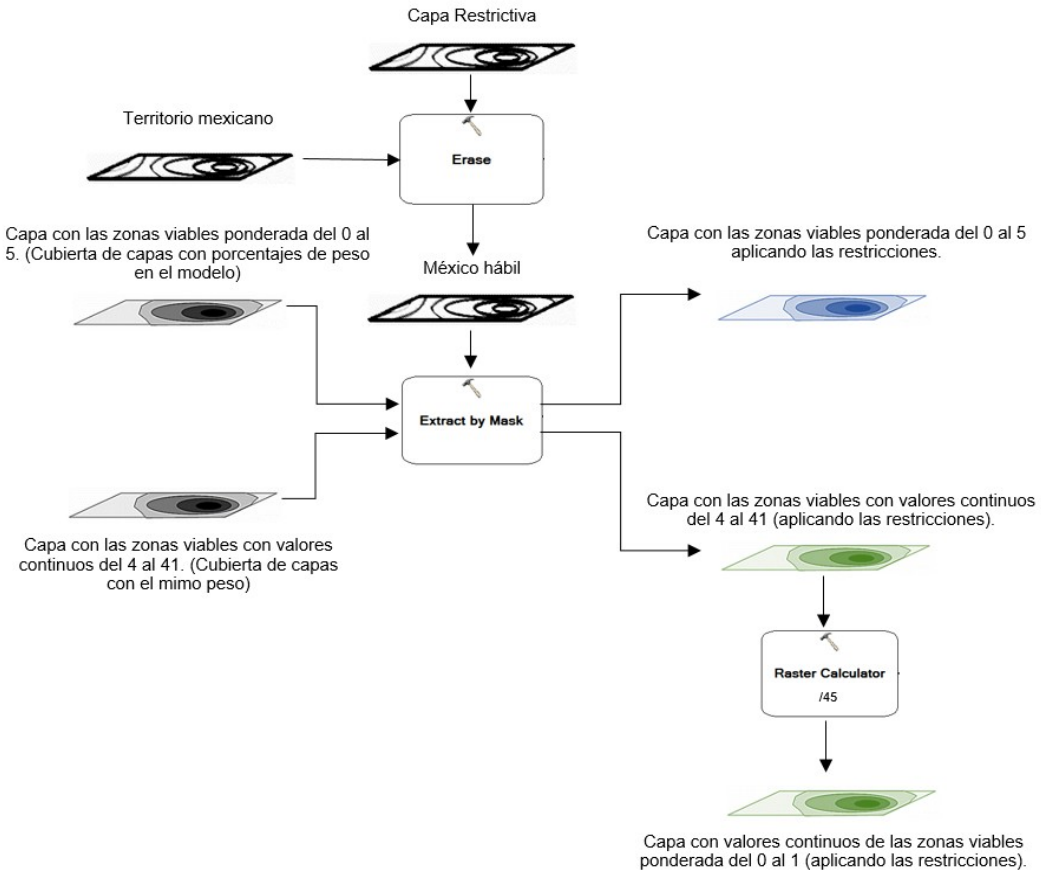


Figura 2. Diagrama del proceso de obtención de la capa restrictiva y área con aptitud para la construcción de los sistemas de cultivo en el territorio mexicano.

4. Resultados y discusión

Se realizaron tres mapas con la herramienta *Weighted Overlay*, cada uno con diferentes pesos de influencia de las capas del modelo, en la Figura 3 se ilustra un mapa con ponderaciones iguales a las obtenidas por otros autores[7] dentro del territorio Norteamericano. Con este porcentaje de influencia en el modelo, se encontraron superficies con un aptitud alta de 25264.84 hectáreas en todo el territorio nacional y muy apta con un área total de 88.26 ha

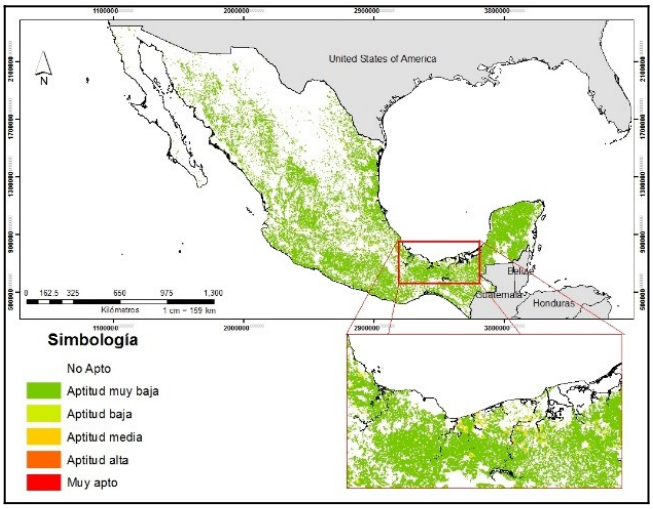


Figura 3. Primer mapa de aptitud en el territorio mexicano para el cultivo de microalgas

En el segundo mapa (Figura 4) se aplicaron valores más distribuidos en el peso asignado a cada capa, se siguió dando prioridad a las fuentes de CO_2 pero se aumentó el porcentaje de influencia a las capas de agua, PTAR's y radiación solar.

La superficie con aptitud alta y muy alta a comparación del primer mapa resultaron ser menores con valores de 20735.81 ha y 71.07 ha respectivamente, sin embargo el potencial medio tuvo un incremento aplicando diferentes pesos a las capas del modelo.

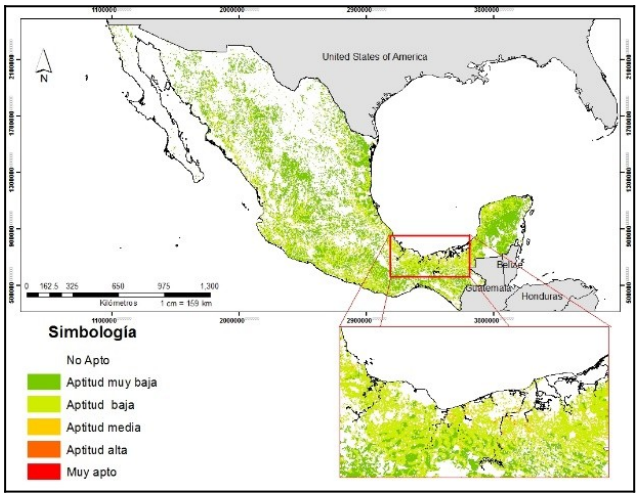


Figura 4. Segundo mapa de aptitud en el territorio mexicano para el cultivo de microalgas.

El tercer y último mapa (Figura 5) incluyó un porcentaje más balanceado en el peso de las capas, contando con el mismo porcentaje a las fuentes de nutrientes (CO_2 y PTAR's); el atributo agua y radiación obtuvieron un peso igual al 18 %; la evaporación y temperatura con un 10 % y las demás capas con diferentes porcentajes a los demás mapas.

En este mapa la superficie con aptitud alta y muy alta no logra ser mayor a la del primer mapa, sin embargo, al compararlo con el segundo modelo se tiene una superficie mayor para la aptitud alta pero menor superficie con aptitud muy alta

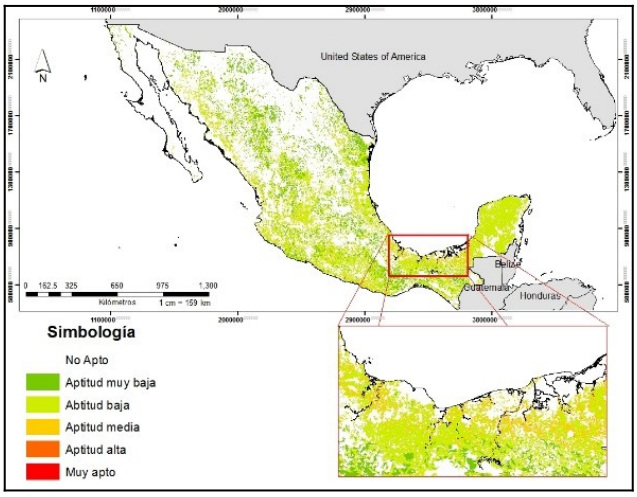


Figura 5. Tercer mapa de aptitud en el territorio mexicano para el cultivo de microalgas.

Por ultimo La herramienta Weighted sum generó una capa con valores continuos del 4 al 41. Esta capa se dividió entre el valor más alto de la suma ponderada (45) para obtener valores comprendidos solamente entre 0 y 1 (Figura 6).

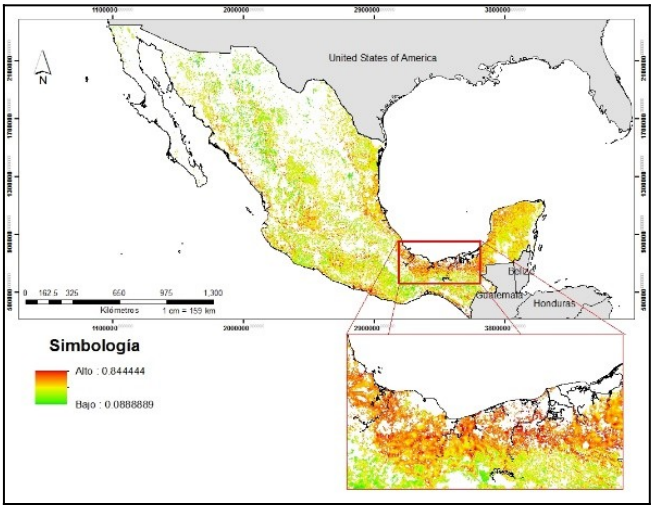


Figura 6. Mapa con valores continuos que representa la aptitud territorial en fracción.

5. Conclusiones

Cerca del 35 % del territorio mexicano logró tener algún tipo de aptitud en los mapas generados, sin embargo las áreas que más deben destacarse son aquellas con aptitud media, aptitud alta y lugares muy aptos, los cuales solo están presentes en menos del 1 % del territorio nacional, su superficie logra alcanzar en promedio 1,582,469 hectáreas.

Los estados ubicados en el Golfo de México (Sureste del país) como Veracruz, Tabasco, Campeche y Yucatán tienen gran potencial para la implementación de estos sistemas de cultivo, en la parte Noreste se encuentra nuevo León con zonas de aptitud media, alta y muy apta al igual que el Sureste de Tamaulipas . Por otro lado la parte Norte y Noroeste del país son zonas muy poco aptas debido a las condiciones geográficas, físicas y climáticas, la península de Baja California es un claro ejemplo de ello. En la parte central se obtuvieron buenos resultados esto debido a la disponibilidad de nutrientes como el CO_2 y el Nitrógeno que son atributos que tienen gran valor en el modelo empleado. Por último está la zona Oeste y Suroeste en los que destacan los estados de Colima y Jalisco con varias zonas de aptitud alta, Guerrero, Oaxaca y Chiapas tienes áreas más puntualizadas y dispersa pero también cuentan con buen potencial.

La influencia que se les dio a las capas es un factor importante que debe ser considerado, especialistas en el cultivo de microalgas a nivel laboratorio colaboraron en la asignación de porcentajes de influencia, sin embargo se recomienda que compañías dedicadas a la producción de biomasa algal mediante sistemas abiertos tengan una participación en el proceso, pues son ellos quienes cuentan con la experiencia en la implementación de estos proyectos.

6. Bibliografía

29. Demirbas, A. and Debirmas, M.F., 2010. Algae Energy: Algae as a New Source of Biodiesel (Green Energy and Tecnhology). Springer.
30. Debirmas, M.F., 2011, Biofuels from algae for sustentainable development, App. Energy 88, 3473-3480.
31. Olguín EJ. 2003. Phycoremediation: key issues for costeffective nutrient removal processes, Biotechnology Advances 22: 81-91.
32. León C & D Chaves, 2010. Tratamiento de residual vacuno utilizando microalgas, la lenteja de agua Lemna aequinoctiales y un humedal subsuperficial en Costa Rica. Revista Latinoamericana de Biotecnología Ambiental Algal 1(2): 155-177.

33. González-López CV, FG Acién, JM Fernández-Sevilla & E Molina. 2011. Uso de microalgas como alternativa a las tecnologías disponibles de mitigación de emisiones antropogénicas de CO_2. Revista Latinoamericana de Biotecnología.
34. Rawat I, R Ranjith-Kumar, T Mutanda & F Bux. 2011. Dual role of microalgae: Phycoremediation of domestic wastewater and biomass production for sustainable biofuels production. Applied Energy 88: 3411-3424.
35. Markou G & D Georgakakis. 2011. Cultivation of filamentous cyanobacteria (blue-green algae) in agro-industrial wastes and wastewaters: A review. Applied Energy 88: 3389-3401.
36. Lundquist, T. J., Woertz, I. C., Quinn, N. W. T., & Benemann, J. R. 2010. A realistic technology and engineering assessment of algae biofuel production. Energy Biosciences Institute.

Sobre los efectos en la salud humana por el campo electromagnético producido por un teléfono celular

Ladino-Luna, D. y Páez-Hernández, R. T.
[1,2]Física de Procesos Irreversibles, Depto. de Ciencias Básicas,

Universidad Autónoma Metropolitana-A, 02200 Ciudad de México, México;

[1]dll@correo.azc.uam.mx, [2]phrt@correo.azc.uam.mx,

1. Resumen

En este trabajo se presenta un análisis de los efectos de la radiación electromagnética debido al uso y manejo de dispositivos móviles, y que aparecen en el momento en que se genera energía disipada que puede causar lesiones en la salud humana, particularmente radiación electromagnética emitida por un teléfono celular. Para hacerlo, se han realizado mediciones con un dispositivo de medición de campo eléctrico PCE-EM29. A partir de estas mediciones, se observa que existe una variación importante del campo electromagnético, sin señal celular y con señal celular. Por lo tanto, estas mediciones pueden indicar que las ondas electromagnéticas podrían dañar el tejido del oído y la región de la cara.

2. Introducción

Como se sabe, cuando una onda electromagnética interactúa con un átomo, o un grupo de átomos, su energía es absorbida por este sistema y se convierte en energía potencial. La energía electromagnética potencial, U_{em}, se expresa como una función de la intensidad de los campos magnético y eléctrico[1,2]. En un punto en el espacio la densidad de la energía electromagnética depende de la suma de los cuadrados de las magnitudes de estos campos. En unidades cgs, esta energía se puede escribir como,

$$U_{em}=\frac{1}{8\pi}\int_V\left(E^2+B^2\right)\,dV \quad , \tag{1a}$$

donde $\vec{E}$ es el campo eléctrico y $\vec{B}$ es el magnético. Se puede escribir una expresión similar para el sistema de unidades internacionales, a saber,

$$U_{em}=\frac{1}{2}\int_V\left(\in_0 E^2+\frac{B^2}{\mu_0}\right)\,dV \quad . \tag{1b}$$

siendo $\in_0$ la permitividad eléctrica en vacío y μ_0 la permeabilidad magnética en vacío. Cuando las aceleraciones de las cargas son muy pequeñas, la cantidad anterior agregada a la energía cinética, K_E, de las cargas se conserva, Esto es,

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(U_{em}+K_E\right)=0 \quad , \tag{2}$$

lo que equivale a definir la energía total como $E_{tot}=U_{em}+K_E$; así, se obtiene la ley de conservación de la energía en presencia de campos electromagnéticos. Para un campo magnético variable en una región del espacio desprovista de partículas cargadas, este toma la forma de onda electromagnética. Este fenómeno ocurre en el caso de las llamadas ondas electromagnéticas, como las ondas de luz, radio y televisión, microondas, rayos infrarrojos, rayos ultravioleta, rayos X o rayos gamma. Entonces, la energía electromagnética se puede calcular a partir del cuadrado de la amplitud de esa onda electromagnética. La conservación de la energía en presencia de cargas eléctricas en movimiento, Ecuación (1.a), se puede justificar[1,2] al considerar un sistema de partículas cargadas dentro de un campo electromagnético, en el que los campos eléctrico y magnético satisfacen las ecuaciones de Maxwell en el vacío

$$\begin{aligned}\frac{1}{\mu_0}\nabla\times\vec{B}&=\vec{j}+\in_0\frac{\partial\vec{E}}{\partial t}\\ -\nabla\times\vec{E}&=\frac{\partial\vec{B}}{\partial t}\end{aligned} \tag{3}$$

donde $\vec{j}$ es la densidad de corriente. Multiplicando la primera de las ecuaciones (3) por el campo eléctrico $\vec{E}$, y la segunda por la inducción magnética $\vec{B}/\mu_0$, y sumando las expresiones resultantes se obtiene,

$$\in_0 \vec{E}\cdot\frac{\partial \vec{E}}{\partial t}+\frac{\vec{B}}{\mu_0}\cdot\frac{\partial \vec{B}}{\partial t}=-\vec{E}\cdot\vec{j}-\frac{1}{\mu_0}\left(\vec{B}\cdot\nabla\times\vec{E}-\vec{E}\cdot\nabla\times\vec{B}\right) \quad , \qquad (4)$$

y por las propiedades de los operadores diferenciales puede reescribirse,

$$\frac{\partial}{\partial t}\left(\in_0 E^2+\frac{B^2}{\mu_0}\right)=-\vec{E}\cdot\vec{j}-\nabla\cdot\left(\frac{\vec{E}\times\vec{B}}{\mu_0}\right) \qquad (5)$$

Al integrarse en un volumen finito que contiene al sistema de cargas considerado, el primer miembro es la energía electromagnética dentro del volumen, el primer término del segundo miembro resulta ser la variación de la energía cinética de las cargas, y el otro término es la integral de la divergencia del vector de Poynting, que se puede transformar en una integral de área, para el vector diferencial de área $d\vec{A}$. Y si los campos tienden al infinito más rápido que $1/r$ se obtiene,

$$\int_V \vec{E}\cdot\vec{j}\,dV=\frac{\partial K_E}{\partial t};$$
$$\int_V \nabla\cdot\left(\frac{\vec{E}\times\vec{B}}{\mu_0}\right)dV=\int_{\partial V}\frac{\vec{E}\times\vec{B}}{\mu_0}d\vec{A}\to 0 \qquad (6)$$

Así, para $V=R^3$, la conservación de energía en presencia de campos electromagnéticos es,

$$\frac{\partial}{\partial t}\int_V\left(\in_0 E^2+\frac{B^2}{\mu_0}\right)dV+\frac{\partial K_E}{\partial t}=\frac{\partial}{\partial t}\left(K_E+U_{em}\right)=0 \quad , \qquad (7)$$

relación que justifica el nombre de energía electromagnética, ya que la suma de la energía cinética y la "energía electromagnética" da lugar a una cantidad física cuya derivada temporal es cero, siendo la derivada de la energía electromagnética igual y opuesta a la energía cinética obtenida por las cargas en movimiento en el campo. Por lo tanto, definiendo la energía total como la suma de la energía cinética y una magnitud dada por (1.b), se obtiene una ley de conservación de energía en presencia de campos electromagnéticos. Pero si no lo es considerando el vacío, considérese un espacio en el que hay una cierta cantidad de materia, que necesariamente tiene cargas móviles, que puede generar campos magnéticos, por ejemplo como cualquier parte del cuerpo humano. La Ecuación (7) se modifica de manera que se incluya el campo generado por la cantidad de materia en consideración. Es decir, cuando una onda electromagnética incide en un átomo, los campos eléctricos y magnéticos de la onda actúan sobre los electrones del átomo. Hay un ajuste del movimiento de los electrones hacia la energía más alta del átomo, que se excita y puede emitir el exceso de energía absorbida.

Un caso interesante en el que se pueden aplicar los comentarios anteriores es la influencia de las nuevas tecnologías de telecomunicaciones en la vida cotidiana de las personas en la sociedad

actual. En los últimos años el uso del teléfono celular ha aumentado de manera considerable. Lo que se puede apreciar si consideramos que aproximadamente el 69 por ciento de la población mundial tuvo cobertura de banda ancha móvil 3G en 2015; lo que representa un aumento del 24 por ciento con respecto a 2011, según la Unión Internacional de Telecomunicaciones (UIT). Además, del último informe estadístico de la agencia, el 89 por ciento de los 4,000 millones (3560 millones) de personas que viven en áreas urbanas tienen acceso a esta tecnología. Incluso se calcula que esta tecnología alcance el 29 por ciento de los 3,400 millones de personas que viven en áreas rurales (986 000 000 de personas) a fines de este año. Estas cantidades conducen a tener en cuenta un estudio serio de los efectos sobre la salud de la población debido a esta tecnología. De lo contrario, en los próximos años se puede hacer, un gran problema de salud mundial por el uso de teléfonos móviles. Hay algunos documentos sobre estos problemas [3-7].

En el presente trabajo se realiza una breve revisión de las características medias del sistema auditivo y de los principios básicos para la obtención de potencia generada por las ondas electromagnéticas, en el espectro electromagnético. Se muestran resultados experimentales para la energía emitida por un teléfono celular que permite establecer la posibilidad de daños en la salud de los humanos por el uso excesivo de dispositivos de comunicación actuales, de acuerdo con varios experimentos reportados, como en [4-7]. Finalmente se discuten los resultados y se exponen breves conclusiones de éstos.

3. Condiciones experimentales

Los humanos somos muy sensibles a la influencia y los cambios en los campos electromagnéticos, de naturaleza naturalmente bioeléctrica. Nuestras células funcionan sobre la base de impulsos eléctricos que generan campos electromagnéticos, gracias a la presencia en nuestro cuerpo de agua, sal, metales y minerales, e incluso nuestros procesos metabólicos de pensamientos. Por lo tanto, es necesario aprender y comprender cómo nos afectan.

3.1 Efectos de las ondas electromagnéticas en la salud humana

Se ha descubierto el profundo impacto de los campos magnéticos a los que estamos expuestos. La intensidad y la longitud de onda de las frecuencias emitidas son fenómenos que se estudian constantemente y los resultados no son muy alentadores. Los siguientes son algunos posibles efectos de los campos electromagnéticos en el cuerpo humano.

Magnetización de efecto (efecto biológico primario): Responsable de la orientación de moléculas dipolares y átomos. Se produce en artículos con momentos magnéticos "distintos de cero". Incluye lo siguiente la modificación de la permeabilidad de las membranas, estabilización del Na, favorecer procesos de enlace estimula la reproducción celular y la activación de sistemas redox.

Efecto piezoeléctrico (efecto biológico secundario):

Efecto directo: produce polarización eléctrica de la masa de un cuerpo o la creación de cargas eléctricas en su superficie cuando se somete a fuerzas mecánicas.

Efecto inverso: responsable de todos los procesos de reparación de tejidos y estimulantes tróficos, a través de control local del flujo sanguíneo a cada tejido.

Control nervioso del suministro de sangre a grandes segmentos de circulación.

Control humoral de ciertas sustancias que aumentan o disminuyen el suministro de sangre.

Cada uno de los procesos biológicos del ser humano está interrelacionado entre sí por una atracción y equilibrio electromagnético natural, lo que permite que nuestro cuerpo funcione como un todo armonioso. Todo lo que nos rodea funciona electromagnéticamente, en palabras más simples, intercambio iónico, es decir, partículas cargadas eléctricamente que atraen o repelen y generan electricidad y campos magnéticos. Las partículas básicas y más conocidas son electrones o aniones (con carga negativa) y protones o cationes (con carga positiva).

3.2 E sistema auditivo

La figura 1 muestra el sistema auditivo. Está compuesto por tres secciones: oído externo, oído medio y oído interno. Cada uno tiene una función en el proceso de audición. En particular el oído medio es una cavidad llena de aire que contiene numerosos elementos anatómicos. Está en el grosor del hueso temporal, entre el canal auditivo y el oído interno. Parte del oído medio, la cavidad timpánica, contiene los huesecillos, parte de la trompa de Eustaquio y la cavidad mastoidea con sistema neumático del hueso temporal. La cavidad timpánica es un espacio que contiene aire y se puede describir como una caja con 5 paredes: la pared o techo superior, llamado tegumento timpánico, es una placa ósea que separa el oído medio de la fosa craneal media; la pared inferior o el piso, se relaciona con el golfo yugular que ocupaba la fosa yugular; la pared anterior, que está formada por la entrada de la trompa de Eustaquio (ET) o protimpan; la pared posterior, que forma una amplia abertura a las cavidades mastoideas llamada aditus ad Antium; la pared lateral, timpánica o externa, consiste en la membrana timpánica y la porción ósea circundante.

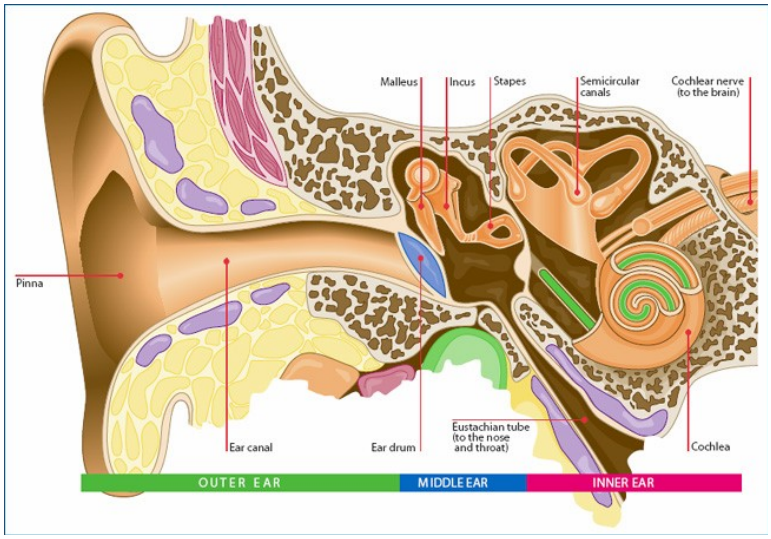


Figura 1. Imagen del sistema auditivo

El tejido epitelial cubre la superficie del cuerpo, las cavidades y conductos del cuerpo. Funciona para proteger los tejidos subyacentes contra la invasión microbiana, la sequedad y los factores ambientales agresivos para la secreción. El revestimiento del epitelio cubre al cuerpo y algunos órganos y conductos, es la parte que responde a los estímulos auditivos. El epitelio escamoso simple altamente adaptado para difusión, ósmosis y filtración ubicado en áreas de poco uso y bajo riesgo de laceración en las líneas de la membrana timpánica.

El oído interno o laberinto se encuentra dentro del hueso temporal. Se puede dividir morfológicamente en laberinto óseo y laberinto membranoso. La médula ósea es la cápsula del laberinto que rodea al laberinto membranoso, y consiste en un hueco que contiene el sistema de endolinfa. Entre los laberintos óseos y membranosos se encuentra la perilinfa, que en parte filtra la sangre y la parte de difusión del líquido cefalorraquídeo. Se reconocen diferentes sistemas del oído interno, el balance de carga del laberinto posterior y la parte responsable del sistema auditivo coclear.

La membrana timpánica se compone de 3 capas: la primera y más externa (también llamada piel, escamosa o lateral) es la continuación de la piel del CAE, la capa intermedia o fibroblástica está formada por fibras radiales internas externas y circulares y finalmente la capa medial o interno es la continuación de la mucosa del oído medio. La superficie del tambor se divide en pares y pares flácidos tensos. El primero se encuentra en los ligamentos del martillo al nivel del proceso corto hasta el piso. El par flácido es más pequeño y está ubicado en la porción superior, carece de fibroblástos y no participa en la transmisión del sonido.

El oído interno resuelve este desajuste de impedancia de dos formas complementarias. Primero, la disminución del área en la que se concentra el movimiento. El tambor tiene un área promedio de 69 mm^2, pero el área de vibración efectiva es de aproximadamente 43 mm^2. El estribo

del pie empuja la ventana oval poniendo en movimiento el material linfático, su área es de 3.2 mm^2. La presión aumenta en consecuencia en aproximadamente 13.5 veces.

La menor intensidad perceptible o umbral de audición, depende de la frecuencia marcada. Un gráfico de los umbrales de medidas en función de la frecuencia se denomina curva audiométrica y, tiene un valor de diagnóstico clínico. El umbral mínimo aproximadamente 10 a 16 W/cm^2, y corresponde a una amplitud de aproximadamente 0.0002 dinas/cm^2 y un movimiento de una de sus moléculas mucho menor que el diámetro de un átomo de hidrógeno. Para observar esta sorprendente sensibilidad en términos prácticos, un amplificador de 10 vatios de eficiencia moderada ubicado en cualquier lugar emite un tono de kHz que debería ser audible a 80 km de distancia.

4. Resultados y discusión

Una de las propiedades más significativas de la onda electromagnética es que transporta energía. La luz de la estrella más cercana, incluso más allá del sol, viaja 25 millones de millas para llegar a la Tierra y, sin embargo, todavía tiene suficiente energía para trabajar en los electrones dentro del ojo. Cualquier campo electromagnético existe dentro de alguna región del espacio y, por lo tanto, es bastante natural considerar la energía radiante por unidad de volumen, es decir, la densidad de energía *u*.

4.1 Energía y momento de la onda electromagnética

Para un campo eléctrico, se puede calcular la densidad de energía,

$$u_E = \frac{1}{2} \in_0 E^2 \quad . \tag{8}$$

De la misma manera, la densidad de energía del campo vectorial $\vec{B}$ es,

$$u_B = \frac{1}{2\mu_0} B^2 \tag{9}$$

La energía que fluye a través del espacio en forma de onda electromagnética se comparte entre el campo eléctrico $\vec{E}$ y el magnético $\vec{B}$ constituyente. Como

$$u = u_E + u_B \quad , \tag{10}$$

claramente

$$u = \frac{\in_0}{2} E^2 + \frac{1}{2\mu_0} B^2 \quad , \tag{11}$$

donde *E* y *B* son las magnitudes respectivas de los campos eléctrico y magnético. Para representar el flujo de energía electromagnética, sea *S* el transporte de energía por unidad de tiempo (potencia) a través de un área unitaria. En el sistema SI tendría unidades de W/m^2. Para medios isotrópicos se puede hacer la suposición razonable de que la energía fluye en la dirección de propagación de la onda, y se define el vector

$$\vec{S} = \frac{1}{\mu_0} \vec{E} ¿ \vec{B} \tag{12}$$

La magnitud de $\vec{S}$ es la potencia por unidad de área que cruza una superficie cuya normal es paralela $\vec{S}$, el vector de Poynting. Debería ser evidente que $\vec{E} \times \vec{B}$ toma ciclos de magnitud máxima a mínima como se muestra en la Figura 2. En las frecuencias ópticas, $\vec{S}$ es una función extremadamente rápida que varía con el tiempo y, por lo tanto, el valor instantáneo sería una cantidad poco práctica para medir. Esto sugiere que cuando una persona se expone a esta energía, absorbe la radiación durante un intervalo de tiempo. Por ejemplo cuando uno usa una fotocelda, causando daño a la retina del ojo humano. El valor de tiempo promedio de la magnitud del vector de Poynting, simbolizado por $\langle S \rangle$, es una medida de la cantidad muy significativa conocida como irradiancia (intensidad), representada por *I*. En este caso, entonces podemos escribir la siguiente igualdad

$$I = \langle S \rangle = \frac{c \in_0}{2} E_0^2 \quad . \tag{13}$$

El flujo de energía total por unidad de tiempo, potencia *P*, sobre alguna superficie *A* se puede escribir en términos del vector de Poynting como,

$$P = \iint_A \vec{S} \cdot d\vec{A} \quad . \tag{14}$$

Nuevamente, considerando las cantidades promedio y sustituyendo (13) en (14),

$$P = IA = \frac{c \in_0}{2} A E_0^2 \tag{15}$$

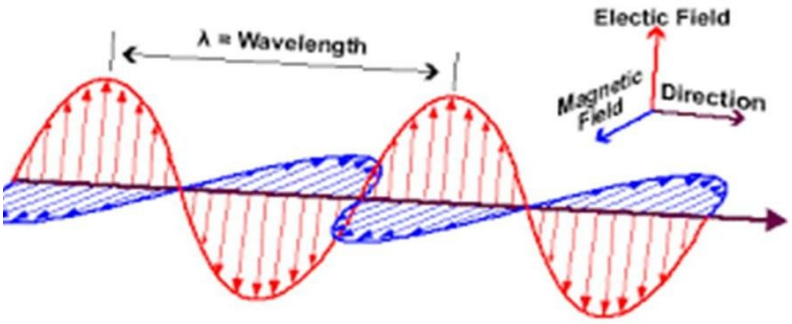


Figura 2. Onda electromagnética que viaja en el espacio libre

4.2 Resultados numéricos

Los resultados preliminares utilizando la teoría de la sección anterior son los siguientes, para un teléfono celular, con longitud de onda $\lambda = 0.354$ m, frecuencia $f = 8.47 \times 10$ Hz y campo eléctrico $E_0 = 5.4 \times 10^{-2}$ V/m. La distancia desde la antena transmisora hasta la señal del receptor fue de 250 m, y se utilizó el área del tímpano, aproximadamente 43 mm^2. De (15) se obtuvo una potencia de salida como 1.66×10^{-10} W /m^2. Aunque este número parece muy pequeño, revisando los datos de la potencia umbral del oído que está cerca de 10^{-10} *W/m*^{2}. Este valor sugiere que es posible producir daños en el oído por ondas electromagnéticas, y es importante señalar que cuando se modifica la distancia del transmisor al receptor, aumenta el campo eléctrico. En la Tabla 1, se muestran medidas del campo eléctrico de dos maneras: cuando el teléfono celular está en espera (primera columna) y cuando el teléfono celular está sonando. Por lo tanto, se puede apreciar la diferencia para la radiación de dos maneras, porque el cuerpo humano siempre está expuesto a la radiación. Además muestra los valores para la potencia de onda electromagnética ejercida la membrana timpánica. Como puede verse, el efecto no es insignificante con respecto al umbral de potencia. Es importante señalar que estas medidas se realizaron con un dispositivo PCE-EM29, que tiene una buena precisión. Y también se señala que se deben realizar otras medidas con diferentes marcas de teléfonos celulares para poder realizar cálculos estadísticos. Y será necesario hacer encuestas a las personas que ya tienen problemas de audición, para determinar si el daño en las personas puede estar asociado con el uso excesivo del uso del teléfono celular.

Tabla 1. Algunos valores de potencia emitidos por un teléfono celular

E (V/m) Registro	*E*$_1$ *(V/m)* Teléfono celular sonando	*A (m*^{2}*)* 10^{-6}	*P (W)* 10^{-10}
672.6X10-3	6.21	43	220.1
1.84	5.153	43	151.5
405.5	16.73	43	159.76

5. Conclusiones

En este documento, el objetivo principal era mostrar cómo el daño en las personas es posible haciendo un uso excesivo del teléfono celular. No es la forma principal de detectar daños en el sistema auditivo y otros órganos, como el cerebro o los tejidos. Además sería importante tomar medidas preventivas para evitar daños colaterales a mucha gente. Las pruebas con diferentes marcas de teléfonos celulares podrían dar mayor precisión en los resultados.

6. Bibliografía

1. Kip, A.T., Fundamentals of Electricity end Magnetism, Chapter 12. McGraw-Hill, 1969.

2. M. Alonso, M., Finn, E.J., Fundamental University Physics, Volume II, Fields and waves, Chapters. 17, 19. Addison-Weslley Pub., 1967.

3. Westerman, R., Hocking, B., Diseases of modern living: neurological changes associated with mobile phones and radiofrequency radiation in humans, Neuroscience Letters. V. 361, 13–16 (2004).

4. Cipresso, P., Serino, S., Villani, D., Repetto, C., Sellitti, L., Albani, G., Mauro, A., Gaggioli, A., Riva, G. Is your phone so smart to affect your state? An exploratory study based on psychophysiological measures, Neurocomputing. V. 84, 23–30 (2012).

5. Gultekina, D. H., Moellerc, L., NMR imaging of cell phone radiation absorption in brain tissue, PNAS. V. 110 [1], 58-63 (2013).

6. Lee, Y.K., Chang, Ch.T., Lin, Y., Cheng, Z.H., The dark side of smartphone usage: Psychological traits, compulsive behavior and techno stress, Computers in Human Behavior. V. 31, 373–383 (2014).

7. Sahin, A., Aslan, A., Bas, O., Ikinci, A., Özyılmaz, C., Sönmez, O.F., Colakoglu, S., Odacı. E., Deleterious impacts of a 900-MHz electromagnetic field on hippocampal pyramidal neurons of 8-week- old Sprague Dawley male rats, Brain Research, V. 1624, 232–238 (2015).

SiO_2-Based Styrene Emulsion Polymerization: In Search of a Pickering Emulsion

Solís-López M, [1] Puente-Lee I,[1] Fouconnier B,[2] López- Serrano F,[1]

[1]Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Química, Universidad Nacional Autónoma de México. Ciudad Universitaria. Cd. Mx. 04510. México

[2]Facultad de Ciencias Químicas, Universidad Veracruzana. Av. Universidad Veracruzana Km. 7.5, Col. Santa Isabel. Coatzacoalcos, Veracruz, 96538. México

maricruzsolislopez@gmail.com; ipl@unam.mx; broger@uv.mx; lopezserrano@unam.mx

1. Abstract

In this work, the effects of several co-aids, considered as modifying agents to vary the compatibility of colloidal silica (Ludox AM) between the monomer/polymer/silica interface during the emulsion polymerization, are evaluated. Sodium vinyl benzene sulfonate (VBS), 4-vinyl pyridine (4VP), poly(ethylene glycol) methyl ether methacrylate (PEGMA) and cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) surfactant, are appraised, being styrene (STY) the main monomer and ammonium persulfate (APS) the initiator. The obtained emulsions range from bare, hybrid encapsulated and Pickering nanoparticles. The obtained Pickering emulsion formulation requires smaller amounts of co-aids, as compared to the reported recipes from the literature.

2. Introduction

A Pickering emulsion polymerization is a reaction process in which inorganic nanoparticles act as stabilizers, located at the monomer/polymer interface, due to their adsorption onto the water-oil interface (W/O). Different types of interactions occur, such as Van der Waals, electrostatic, hydrogen bonds, and so on. The reader is referred elsewhere[1-3] for a deeper explanation of Pickering polymerization emulsions.

Vignati and Piazza,[4] discovered that emulsions can be stabilized with only about 5% particle coverage at the interface.

Thus, Pickering emulsions have wide applications in different areas; for instance, food,[5] catalysis,[6] pharmaceutical[7] and materials,[8] among other applications.

Obtaining an emulsion polymerization stabilized by solid particles, among other things, depends upon: the particle size, the concentration, the wettability, and interactions between particles and oligomers. However, the relative balance between the hydrophilic and lipophilic properties of these particles is considered the most important parameter that governs the stabilization of such emulsions. The wettability can be easily modified, with non-ionic,[9] anionic[10] and cationic[11] surfactants, by electrostatic adsorption, or other interactions. Another approach is the use of

modifying-agents which can be co-monomer(s), macromonomers or polymers, thus avoiding the use of a surfactant agent.

Several studies conclude that stable emulsions can be formed if solid particles are weakly flocculated, by the addition of salts,[12] or by the use of surfactants.[13] It has been reported that the presence of cetyltrimethylammonium bromide (CTAB) produces flocculation of silica particles.[11,14,15] Binks and Rodrigues,[16] conducted an investigation regarding the behavior of emulsions stabilized by silica nanoparticles and a cationic surfactant (CTAB). They found that more stable emulsions were formed under conditions in which CTAB was used to decrease the load and induce silica flocculation, and Lan et al.,[17] obtained a similar result,

Solid nanoparticles, such as Ludox AM, remain negatively charged over a wide pH range, [18] although the use of some agents (i. e., surfactants) can change the value in its charge (mV) into a negative range, which will depend on the amount used. It was also reported that this silica, which, unlike cationic silica or other colloids, is less susceptible to modification by perturbations of the medium, such as pH. [19]

Monégier du Sorbier et al. [20] considered the use of poly(ethylene glycol) methyl ether methacrylate (PEGMA), instead of a surfactant, with anionic silica nanoparticles (TM-50), in a pH range of 2-10. They obtained a PEGMA adsorption of 25%, on the silica surface, without any significant effect on the charge density. With the addition of PEGMA at high concentrations (approximately 50% w/w), the silica loading is maintained around -60 mV, with a slight pH variation of 9.5 to 9.0. However, it turned out to be a low stabilization by the relatively low value of adsorption, compared to the adsorption of poly(4-styrene-sodium sulfonate), which was also analyzed. Their polymerization was carried out with an anionic initiator, sodium persulfate (NaPS), and they reported homogeneous-coagulative nucleation.

Percy et al.[21] obtained polymer-silica nanocomposite particles by homopolymerizing 4-vinylpyridine (4VP) in the presence of a silica sol using a free-radical initiator in aqueous media. They reported that the homopolymerization of either styrene or methyl methacrylate did not produce nanocomposite particles. However, copolymerization of 4VP with methyl methacrylate and styrene did produce colloidal stable particles, for comonomer feeds containing as little as 6 mol % 4VP. They commented that using 4VP was serendipity because Barthet et al. [22] were not successful with 2VP. Later however, Dupin et al. [23] reported that colloidal poly(2-vinylpyridine)-silica nanocomposite particles were efficiently prepared by emulsion polymerization. They claim that the key to their success was simply a suitable selection of cationic azo initiator. Zou et al. [24] also reported the preparation of solid silica-coated and hollow poly(styrene-co-4-vinylpyridine) particles.

The literature discloses that obtaining a Pickering emulsion by polymerization is simple and straight forward.[25-29] It will be disclosed that, even after an intensive literature review, this is not always true, and that the reported recipes have been reached after long searches of trial and error experiments or by serendipity. However, small steps leading toward a better understanding of this complex area are given, and this is what motivates this work. According to the above literature

reports, this work considers a series of reactions, with the aim of reaching a simple Pickering emulsion formulation. The effects of the studied co-aids on the particle size, encapsulation and whether or not coverage occurs, are analyzed.

3. Experimental

3.1 Materials

Styrene (STY) 99% was washed to remove the inhibitor. The remaining reagents were used as received. Hexadecyltrimethylammonium bromide (CTAB), 98% purity; the colloidal dispersion of silica nanoparticles (LUDOX AM), containing SiO_2 30% w/w in water, d_p = 12 nm; 4-vinyl pyridine (4VP), 95% purity; sodium 4-vinylbenzenesulfonate (VBS) greater than 90% purity; and poly (ethylene glycol) methyl ether methacrylate (PEGMA), 50% w/w in water, Mn=2000, (all from Sigma-Aldrich). Ammonium persulfate (APS), 99.2% purity, sodium bisphosphate 99.3 % purity and disodium phosphate 99.3 % purity (these latter from J. T. Baker, S.A. de C.V.). The water used was deionized in our laboratory.

3.2 Reaction Procedure

The amounts charged in the experiments are presented in Table 1. In a first step, an emulsion was prepared charging the water, the styrene monomer (as the oil phase), the aqueous dispersion of silica nanoparticles and the buffer. If used, 4VP was incorporated into the oil phase and VBS, CTAB and PEGMA were added to the aqueous phase. This preparation was then mixed for five minutes in an Ultra-Turrax T25 at 15,000 rpm. This dispersion is called the pre-emulsion. In the second step, the pre-emulsion was introduced into a volumetric flask, purged with nitrogen for 5 min. After degassing, the initiator (APS) was introduced. Then, the flask was set into the controlling heating bath (Shaker SHZ-88 at 150 rpm) at 80°C and was allowed to react for 2.0 hr.

3.2.1 Buffer Solution Preparation

Table 2 lists the ingredients used to prepare the buffer solution. The solid content corresponds to the theoretical value. This value was corroborated with humidity balance (OHAUS MB35). The verification for the pH value was performed with a potentiometer (Oakton), yielding a value of 7.0. The objective was to obtain a “pre-emulsion” with an initial pH=8.

Table 1. Experimental runs based on one hundred parts of monomer (pph), dry basis.

Reagents/Exp.	1	2	3	4	5	6

STY	100	100	100	100	100	100
Ludox AM	-	15	15	15	15	15
APS	2	2	2	2	2	2
4VP	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5
VBS	-	-	0.5	0.5	0.5	0.5
CTAB	-	-	-	0.1	0.05	-
PEGMA	-	-	-	-	-	0.1
Buffer *	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15	0.15

* Buffer ingredients are listed in Table 2.

Table 1. Preparation of buffer solution.

Reagents	Amount (g)	Purity (%)	Active Parts
NaH_2PO_4	0.692	99.3	0.687
Na_2HPO_4	2.840	99.3	2.820
H_2O	96.468	---	---
		Total Solids (%)	3.362

3.3 Particle Size Measurements

3.3.1 Light dispersion

The average polystyrene nanoparticle size was determined by dynamic light scattering at 25°C, using a Zetasizer Nano-ZS2000 (Malvern Instruments Ltd., Malvern, Worcestershire, UK) with a refractive index of 1.509.

3.3.2 Electron Microscopy

A latex drop was added was added to 50 mL of water and one drop of this solution was set onto a copper grid covered with carbon and formvar and dried before the observations. The acceleration voltage was 200 kV in a JEOL transmission electron microscope model 2010. Several fields were selected to obtain the images.

4. Results and Discussion

Exp. 1 is the blank, being an emulsifier-free styrene polymerization. Previous experiments were performed to find the adequate amount of SiO_2, to obtain a suitable disperse system at the end of the reaction, which corresponds to Exp. 2. The remaining experiments contain 15 parts per hundred monomer (phm) of SiO_2. Exp. 3 to Exp. 6 contain the same amount of VBS and 4VP. With Exp .4 and Exp 5 the addition of CTAB is evaluated at two different levels, and Exp. 6 explores the addition of PEGMA effect. The dry basis formulations are presented in Table 1. The amount of water was adjusted to obtain emulsions at about 20 % solids.

Figure 1 shows the appearance of the recipes after applying the high shear agitation (15,000 rpm, for five minutes, before adding the initiator). Based on this figure, an increase in the homogeneity results in the experiments' order. As expected, the first two experiments (1 and 2) present complete phase separation, even after the high shear exposure. As can be seen, the addition of 4VP and VBS was not enough to achieve homogeneity (Exps. 3 to 5). Indeed, at a pH value of 8.0, 4VP molecules cannot adsorb onto the negatively charged silica nanoparticles surface, because the amine groups contained in the 4VP molecules are not protonated; moreover, VBS is an anionic monomer. Consequently, the silica nanoparticles are not surface modified. Therefore, neither the SiO_2 nanoparticles nor the co-aids stabilize monomer droplets. However, the emulsion homogeneity increases from Exps. 4 to 6. Therefore, the CTA+ anions adsorb onto the negatively charged silica nanoparticles, due to electrostatic attractions, and inherently induce their flocculation, due to Van der Waals interactions, occurring between the oriented towards the aqueous phase CTA+ chains. The monomer droplets stability depends on the hydrophobicity and the CTAB-silica nanoparticle aggregates size and therefore, on their ability to diffuse away and form a structured film at the W/O interface droplets. [30] Exp. 6 shows that the addition of PEGMA, acting as a silica modifier, is enough to impart a good droplet dispersion, because it does interact with the negative silica nanoparticles and therefore, the wettability of silica nanoparticles is changed. [20] Summarizing, the dispersion of the phases increases in the following order: blank < silica < co-monomers < surfactant (CTAB) < polymer (PEGMA).

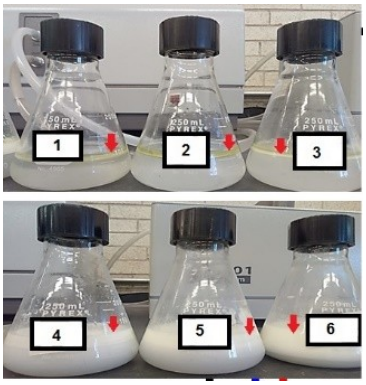


Figure 1. Appearance of the emulsions after applying a high shear agitation. The samples correspond to the flask as indicated in Table 1.

The conversion was measured by gravimetry, the grit percent was determined by filtering the emulsion in a 140 mesh and the final pH by potentiometry. All the reactions, except Exp. 5 (with a low amount of CTAB), yield high conversions (> 80 %) and low grit content (< 1%). Grit generally originates from particle coagulation, poor stabilization, or both. The blank (Exp. 1) shows that an emulsion can be obtained without the use of an emulsifier. It is obvious that the amount of initiator is very high and this ingredient does provide enough electrostatic charges to achieve a stable emulsion. The pH of the emulsions decreases importantly. This is caused due to the high amount of initiator because, as the initiator decomposition proceeds, the sulfate groups lower the reaction medium pH. Table 3 shows the size and number of distributions, as well as the statistical percentiles for 50 and 90% of the distribution. Here, the blank (Exp. 1) has the largest and broadest particle size distributions, showing two populations. The experiment having only silica (Exp. 2) also shows two distributions; however, the particle size is reduced. This particle size reduction is due to the silica acting as a nucleating agent which has been explained. [15] Bare silica nanoparticles interfere in the nucleation and coagulation processes due to weak hydrogen π-bonding interaction between the oligomers/monomers phenyl groups and the silica nanoparticles' silanol groups, at acid pH conditions.[30]

Table 3. Size distributions for all reactions.

Experiment	D (0.5) nm	D (0.9) nm	Number of Distributions	Distributions Range D (nm)
1	978	1150	2	138-182 955-1,096
2	571	757	2	209-275 631-724
3	170	186	1	158-182
4	193	247	1	158-240

5	191	223	1	182-209
6	281	362	1	233-316

Note: D (0.5) and D (0.9) represent the statistical percentiles

Exp. 3, having only 4VP and VBS, presents the smaller and narrower particle size distribution (PSD). Strong acid-base interaction between the 4VP nitrogen atoms and silica hydroxyl groups aids in making the silica particles more compatible. 4VP and VBS, both being water soluble, will promote large oligomers in the water phase that will promote the polymer particle homogeneous nucleation. Besides, both will also benefit the particle stabilization, due to their electrostatic charges. Exps. 3 to 6 present only one PSD. Exp. 5, the one that has a lower CTAB concentration, shows smaller size particles; however, has a very low conversion, meaning that the particles could not grow enough. The addition of PEGMA in Exp. 6 increases the particle size when compared to Exps. 3 to 5.

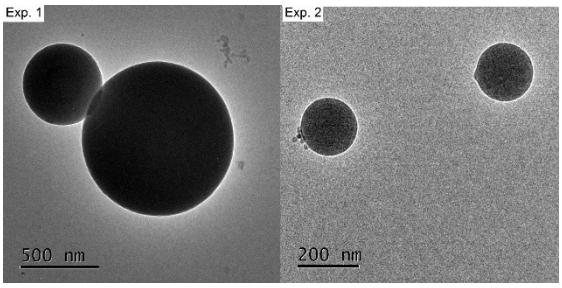


Figure 2. TEM images emulsion polymerizations for Exp.1 (left) and Exp. 2 (right).

With respect to the TEM micrographs, Exp. 1 is a blank containing monomer (STY), buffer and initiator (APS). Its corresponding image is shown on the left side of Figure 2. Two main characteristics can be observed: the polymer particles present very different sizes, leading to two size distributions, in a range of 138-182 and 955-1,096, as shown in Table 3, and these particles are much larger than those obtained in the rest of the reactions (Exps. 2 to 6). Differently, this experiment shows the highest conversion value (94.46%) of all the runs. This high conversion value might be due to a gel-effect where an auto-acceleration occurs, yielding a temperature increase and therefore, higher conversions. [31] The very large particles' size might be caused by coagulation due to poor stabilization because the only stabilization is provided by the sulfate groups from the initiator. The RHS of Figure 2 presents the micrograph corresponding to Exp. 2, where only silica is added. Here it can be observed that adding SiO_2 is not enough to guarantee a Pickering emulsion, and the conversion reached was 92.44%. In this micrograph it is not clear if the silica is behind the particles or contained inside them. As mentioned above, the presence of silica promotes particle nucleation, yielding smaller particle sizes, which has been explained previously.[15] However, two particle size distributions also are observed (See Table 3).

Figure 3 shows Exps. 3 (LHS) and 4 (RHS), both containing 4VP and VBS, but the latter has 0.1 pph of CTAB. Neither micrographs show a Pickering emulsion, it also seems that the silica is inside the particles. These two formulations imply that, for obtaining a Pickering emulsion polymerization, simply adding the ingredients reported in the literature is not sufficient. Thus, the addition of 4VP, reported by Percy et al., [21] even tested with different monomers such as STY, MMA and BuA and BuMA,[32] with the amounts proposed here for these co-aids, it did not yield the desired result. It is worth mentioning that the aforementioned mentioned authors used much higher amounts of 4VP and worked at lower monomer concentrations, a maximum of 10%.

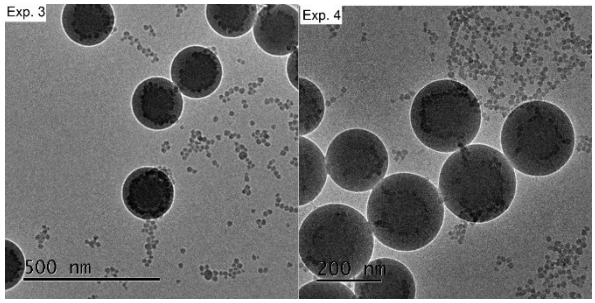


Figure 3. TEM images emulsion polymerizations Exp 3 (4VP + VBS) and Exp. 4 (4VP/VBS/CTAB 0.5/0.5/0.1)

Exp. 3 explores the use of 4VP and VBS, at 0.5 pph each, and as shown in Table 3, this combination had a large impact not only in particle size decrease but also yielding one particle size distribution only, in the range of (158-182 nm) when compared to Exp. 1 (blank) and Exp. 2 (only silica). Consequently, the addition of co-aids enhances the oligomers stability effect and homogeneous nucleation during the reaction. Basically, the anionic APS initiator provides stability to the latex particles, to a certain extent, due to the electrostatic repulsions, but also the silica nanoparticles can promote homogeneous nucleation and decrease coagulation in an acid pH condition, *via* π hydrogen bonding formed between the oligomers' phenyl groups and the nanoparticles' silanol groups.

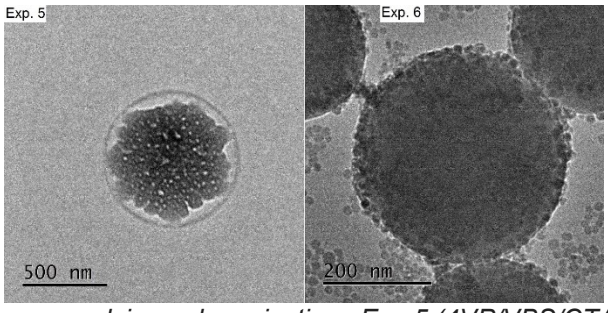


Figure 4. TEM images emulsion polymerizations Exp 5 (4VP/VBS/CTAB 0.1) and Exp. 6 (4VP/VBS/PEGMA 0.5/0.5/1.0).

Even with the presence of a buffer solution, the initial pH value of 8.0 decreases to values of around 3.0. The corresponding pH values are found in Table 3 for all polymerizations (Exps. 1 to 6). On the other hand, the presence 4VP molecules interfere in the polymerization process because, while some molecules react, others can also adsorb onto the silica nanoparticles, leading to the surface structure modification and hydrophobicity during the reaction. At the beginning of the reaction, the pH value is 8.0 and the silica nanoparticles are negatively charged, thus the 4VP amino groups cannot interact with silica. Nevertheless, as soon as the reaction media pH value becomes acid, the VBS sulfonate groups are transformed into sulfonic acid groups, which are highly polarized, and then the 4VP groups will further protonate from a pH value of 5.62 (4VP pKa constant). In acid solutions, the silica nanoparticles can interact on one side with 4VP groups present in monomers, or the ones contained in the oligomers. On the other hand, 4VP groups can interact with the VBS sulfonic acid groups, *via* dipole-dipole interactions. Obviously, all interaction effects depend on the concentration of each added moiety in the reactor. In experiment Exp. 3, 4VP molecules cannot be completely available for interacting with the silica nanoparticles, as they also interact with VBS molecules,

leaving only 1.5 mmol of 4VP interacting with silica nanoparticles, which represents around 0.95 4VP molecules adsorbed per nm^2 (if totally adsorbed). Therefore, from previous considerations, the following mechanism can be proposed: as soon as the reaction is initiated, VBS and 4VPS react with radicals as they are dissolved in the aqueous phase to form oligomers promoting nucleation. As the polymerization process proceeds, the pH decreases until becoming acid; therefore, interactions between the silanol group/SiO^- moeities and the 4VP amino groups will be favored, but similarly 4VP amino groups can interact with the VBS sulfonic acid groups. Consequently, a certain amount of 4VP molecules adsorb onto the silica nanoparticle surface, polymerizing with monomers dissolved in the aqueous phase. to give rise to SiO_2-oligomers. Similarly, other N^+-H groups, present on growing oligomers not attached to silica particles, can interact with silica nanoparticles, SO_2-OH groups of unreacted VBS and oligomers containing SO_2-OH groups. As a result, all these growing oligomers will eventually become insoluble and will precipitate into VBS-4VP-Sty copolymer nuclei covered by silica nanoparticles and hydrophilic SO_2-OH/N-H dipole-dipole groups with a pendant hydrophobic reactive tail oriented towards the water phase, as these hydrophilic groups cannot penetrate into the nuclei core. For better clarity, a scheme representing the mechanism is presented in Figure 5. After precipitation the growing particles will grow *via* monomer swelling and finally resulting in latex particles, containing silica nanoparticles in their core.

It is worth mentioning that encapsulating the silica particles, in some applications, can be really beneficial. For instance, this is shown in the case of matrix reinforcement with nanoparticles for thermal and mechanical properties,[33] and high permitivity, [34] among others. This encapsulation effect is certainly provided by the presence of VBS molecules, due to dipole-dipole attractions between the 4VP amino groups and the sulfonic acid group in acid pH conditions. Comparing Exp. 3 with Exps. 4 and 5, CTAB has been added to the reaction media. It is well known that CTA+ anions, adsorbed onto the negatively charged silica nanoparticles, modify their surface charge and hydrophobicity, inducing their agglomeration. Also, due to Van der Waals interactions between CTA+ tails oriented towards the aqueous phase. Furthermore, it can be observed that at 0.05 pph, the silica nanoparticles are completely encapsulated, whereas at 0.1 pph, they are not totally captured in the polymer matrix. Comparatively in Exp. 5, at low CTAB concentration, the hydrophobicity induces the silica nanoparticles flocculation and the adsorption of 4VP groups of monomers/oligomers onto the silica nanoparticles during the reaction, favoring the encapsulation of the silica nanoparticles. Nevertheless, it is worth mentioning that this formulation did not reach satisfactory conversions (*ca.* 57%); therefore, this is not a favorable formulation. Probably, the SiO_2-CTAB aggregates' wettability is not sufficient to adhere easily at the W/O interface, to stabilize monomer droplets which thus impede a good monomer delivery during the polymerization

Finally, Exp. 6 shows a Pickering emulsion polymerization system. Two main facts can be observed: the coverage is not uniform and many silica particles are free in the medium. Contrarily, the formulation achieved contains smaller amounts of the co-aids reported in the literature; for instance, Almavy et al. [32] for a BuA/4VP polymerization the smallest amount of 4VP used was 9 mol % and Percy et al., [21] for STY and MMA, the least amount for STY was 6 mol % and 4 mol 5 for MMA. In the case of PEGMA, du Sorbier et al. [20] used high concentrations (approximately 50% w/w) of the silica loading, Therefore, in this work, we obtained a synergistic effect for 4VP/VBS/PEGMA, using overall 1.1 pph. The proposed formulations allowed obtaining polymer microspheres partially covered by silica nanoparticles. In that case, it should be considered that N-H groups of 4VP molecules/oligomers can interact with sulfonic acid group of VBS monomers/oligomers and also with PEGMA monomers/oligomers. Ergo, the amino groups interact a little with the silica nanoparticles which are not consequently involved in the oligomer stabilization.

5. Conclusions

The effects of several co-aids, reported in the literature, were tested as modifying agents to a styrene/colloidal silica system. It was found that the addition of 0.5 parts of sodium vinyl benzene sulfonate and 4VP, with or without 0.05 or 0.1 parts of CTAB, were not

sufficient to produce Pickering emulsions. On the other hand, some formulations yielded encapsulated silica particles, which can be useful for important applications. Finally, a Pickering formulation was obtained containing 4VP, VBS and PEGMA with amounts inferior to those reported in the literature, allowing the achievement of a simple Pickering emulsion polymerization system. In a forthcoming work the kinetics of the obtained Pickering formulation will be presented.

Acknowledgments: Funds for this work were provided by UNAM-DGAPA (PAPIIT IN114018) and FQ (PAIP 5000-9080) are gratefully acknowledged.

6. References

[1] Schrade A., Landfester K., Ziener U. Pickering-type stabilized nanoparticles by heterophase Polymerization. *Chem. Soc. Rev.* 42, 6823-6838 (2013).

[2] Ngai T., Bon S. A. F. In *Particle-Stabilized Emulsions and Colloids Formation and Applications*; Thomas Graham House, Cambridge, UK, 2015.

[3] Lotierzo A; Bon S. A. F. A mechanistic investigation of Pickering emulsion Polymerization *Polym. Chem.* 8, 5100-5111 (2017).

[4] Vignati E., Piazza R. Pickering Emulsions: Interfacial Tension, Colloidal Layer Morphology, and Trapped-Particle Motion. *Langmuir* 19, 6650-6656 (2003).

[5] Augustin M. A., Hemar Y. Nano- and micro-structured assemblies for encapsulation. *Chem. Soc. Rev.* 38, 902-912 (2009).

[6] Ning Y., Yang Y., Wang C., Ngai T. and Tong Z. Hierarchical porous polymeric microspheres as efficient. *Chem. Commun.*, 49**,** 8761-8763 **(**2013)**.**

[7] Sanyal S., Huang H.-C., Rege K., Dai L. Thermo-Responsive Core-Shell Composite Nanoparticles Synthesized via One-Step Pickering Emulsion Polymerization for Controlled Drug Delivery. *J. Nanomedic. Nanotechnol*. 2-7 (2011).

[8] Sanchez C., Belleville P., Popall M., Nicole L. Applications of advanced hybrid organic–inorganic nanomaterials: from laboratory to market. *Chem. Soc. Rev.* 40, 696-753 (2011).

[9] Midmore B. Interaction between colloidal silica and a nonionic surfactant hexagonal liquid crystalline phase. *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 182, 83-92 (2001).

[10] Tushar S., Kumar G. S., Chon B. H. and Sangwai J. S. Thermal stability of oil-in-water Pickering emulsion in the presence of nanoparticle, surfactant, and polymer. *J. Ind. Eng. Chem.* **2015,** 22, 324334.

[11] Lebdioua K., Aimable A., Cerbelaud M., Videcoq A., Peyratout C. Influence of different surfactants on Pickering emulsions stabilized by submicronic silica particles. *J. Colloid Interf. Sci.* 520, 127-133 (2018).

[12] Binks B. P.; Lumsdon S. O. Stability of oil-in-water emulsions stabilised by silica . *Phys. Chem. Chem. Phys.* 1, 3007-3016 (1999).

[13] Lucassen-Reynders E. H., Van DenTempe M. Stabilization of water-in-oil emulsions by solid particles*. J. Phys. Chem.,* 67, 731-734 (1963) .

[14] Zhou Y., Zhao Y., Wang H., Du Q. Effect of Initiation Site Location on Morphology of Polymer Microspheres via Pickering Polymerization. *J. Polym. Sci. Part A: Polym. Chem.* 50, 3537-3545 (2012).

[15] Fouconnier B., Román-Guerrero A., López-Serrano F. Pickering emulsion polymerization kinetics of styrene: Comparison of bare and surface modified SiO2 nanoparticles. *J. Macromol. Sci, Part A: Pure Appl. Chem.* 53, 403-412 (2016).

[16] Binks B. P., Rodrigues, J. A. Synergistic Interaction in Emulsions Stabilized by a Mixture of Silica Nanoparticles and Cationic Surfactant. *Langmuir 23*, 3626-3636 (2007).

[17] Lan Q.; Yang F., Zhang S., Liu S.; Xu J., Sun J., D. Synergistic effect of silica nanoparticle and cetyltrimethyl ammonium bromide on the stabilization of O/W emulsions *Colloids Surf. A: Physicochem. Eng. Aspects* 302, 126-135 (2007).

[18] Kammona O., Kotti K., Kiparissides C., Celis J. P., Fransaer J. Synthesis of polymeric and hybrid nanoparticles for electroplating applications. *J. Electrochimica Acta***,** 54, 2450-2457 (2009).

[19] Boussu K., Belpaire A., Volodin A., Van Haesendonck C., Van der Meeren P., Vandecasteele C., Van der Bruggen B. Influence of membrane and colloid characteristics on fouling of nanofiltration membranes. *J. Membrane Sci.* 289, 220-230 (2007).

[20] Monégier du Sorbier Q., Aimable A., Pagnoux C. Influence of the electrostatic interactions in a Pickering emulsion polymerization for the synthesis of silica-polystyrene hybrid. *J. Colloid Interface Sci*. 448, 306-314 (2015).

[21] Percy M., Barthet C., Lobb J., Khan M., Lascelles S., Vamvakaki M., Armes S. Synthesis and Characterization of Vinyl Polymer-Silica Colloidal Nanocomposites. *Langmuir*16, 6913-6920 (2000).

[22] Barthet C., Hickey A. J., Cairns D. B., Armes S. P. Synthesis of Novel Polymer-Silica Colloidal Nanocomposites via Free-Radical Polymerization of Vinyl Monomers *Adv. Mater*. 11, 408-410 (1999).

[23] Dupin D., Schmid A., Balmer J. A., Armes S P. Efficient synthesis of poly(2-vinylpyridine)-silica colloidal nanocomposite particles using a cationic azo initiator *Langmuir* 23, 11812-11818 (2007).

[24] Zou H., Wu S., Shen J. Preparation of Silica-Coated Poly(styrene-co-4-vinylpyridine) Particles and Hollow Particles. *Langmuir* 24, 10453-10461 (2008)

[25] Zhang W. H., Fan X. D., Tian W. and Fan W. W. Polystyrene/nano-SiO2 composite microspheres fabricated by Pickering emulsion polymerization: Preparation, mechanisms and thermal properties*. eXPRESS Polym. Lett.* 6, 532-542 (2012).

[26] Ye L., Zhou T., Shen X. Molecular imprinting in particle-stabilized emulsions: enlarging template size from small molecules to proteins and cells. *Mol. Impr.* 3, 8-16 (2015).

[27] Benhamou M., El-Moudny S. Review on Pickering emulsions stabilized by adsorbed nanoparticles: Structure, Thermodynamics, Cage Effect and Subdiffusion. *Int. J. Nanomater. Nanotechnol Nanomed.* 3, 057-076 (2017).

[28] Wang Y., Li X., Shen C.; Mao Z., Xu H., Zhong Y., Sui X., Feng X., Wang B. Lignin assisted Pickering emulsion polymerization to microencapsulate 1-tetradecanol for thermal management *Int. J. Biol. Macromol.* 16 Available online 21 December 2019 https://doi.org/10.1016/j.ijbiomac.2019.12.17530 (2019).

[29] Zhang J., Lu Z., Wu M., Wu Q., Yanga J. Facile fabrication of poly(acrylic acid) hollow nanogels *via in situ* Pickering miniemulsion polymerization. *Polym. Chem.* 6, 6125-6128 (2015).

[30] Fouconnier B., Terrazas-Rodríguez J. E. and F. López-Serrano (2017) Monitoring styrene Pickering SiO2-supported emulsion polymerization kinetics by Raman spectroscopy: Elucidating mechanisms interpreting the silanol/phenyl π-interactions, *J. Macromol. Sci. Part A Pure Appl. Chem.,* 54, 509-515 (2017).

[31] Thickett S. C. and Gilbert R. G. Emulsion polymerization: State of the art in kinetics and mechanisms *Polymer***,** 48, 6965-6991(2007).

[32] Amalvy J. I., Percy M. J. and Armes S. P. Synthesis and Characterization of Novel Film-Forming Vinyl Polymer/Silica Colloidal Nanocomposites. *Langmuir* 17, 4770-4778 (2001).

[33] Hussain F., Hojjati M., Okamoto M., Gorga R. Polymer-matrix Nanocomposites, Processing, Manufacturing, and Application: An Overview. *J. Compos. Mater.* 40, 1511-1575 (2006).

[34] Dang Z.-M., Yuan J.-K., Zha J.-W., Zhou T., Li S.-T., Hu G.-H. Fundamentals, processes and applications of high-permittivity polymer–matrix composites. *Progr. Mater. Sci.* 57, 660-723 (2012)

Detección del ángulo de arribo de señales de voz en movimiento

Escobar L. H.,[1] Flores M.A.[2] y García C.I.[3]

[1,2,3] Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México

esco_lar@yahoo.com, mickey.floresg@gmail.com, karlos.kigs@gmail.com

1. Resumen

Se presenta un sistema que estima en tiempo real el ángulo de arribo (DOA) de una señal de voz proveniente de una fuente en movimiento, utilizando un arreglo de micrófonos con técnicas de formador de haz (BF). A la fecha, se han desarrollado diferentes metodologías y algoritmos para la estimación de DOA de fuentes de voz estáticas, como correlación, espectrales y basados en valores característicos. En este trabajo se presenta resultados con fuentes de voz en movimiento en un arreglo con seis micrófonos, con la metodología BF adaptale del tipo de cancelación de lóbulos laterales (GSC)[1,2,3] y posteriormente un filtro de Kalman para una mejor estimación del DOA[4], para detectar señales de voz provenientes de diferentes fuentes posicionadas dentro de un intervalo angular $0^0 \leq \theta < 360^0$. En las pruebas se obtuvieron variaciones angulares con valor mínimo de un grado y máximo de seis grados.

2. Introducción

En ambientes reales se presentan múltiples reflexiones y reverberaciones que tienden a convertirse en interferencia o ruido ambiental y afectan la señal deseada a detectar. La aplicación de arreglos de sensores se basa en el tratamiento de los datos adquiridos por medio de diferentes micrófonos ubicados en lugares específicos, esta técnica se basa principalmente en el proceso de estimación de retardos y variaciones de amplitudes de los frentes de onda adquiridos en cada uno de los elementos del arreglo. Los retardos de tiempo de arribo entre micrófonos van a depender del tipo de geometría del arreglo seleccionado, la distancia entre la fuente de señales y la referencia del arreglo de micrófonos. Las aplicaciones más comunes en el uso de arreglos de micrófonos se centran en la reducción de ruido, localización y seguimiento de fuentes de sonido, y filtrado espacial, separación de fuentes, entre otras.

Este trabajo utiliza la metodología BF, realizando filtrado espacial de fuentes de señales de voz, y calcula la energía direccionando el ángulo del formador de haz, con la metodología BF adaptale del tipo de cancelación de lóbulos laterales (GSC) y posteriormente un filtro de Kalman para una mejor estimación del DOA. Se presenta los resultados obtenidos con fuentes de voz en movimiento que se adquirieron por medio de un arreglo circular utilizando seis micrófonos. Se estima la dirección de arribo de señales de voz provenientes de diferentes fuentes posicionadas dentro de un intervalo de $0^0 \leq \theta < 360^0$ grados. Las variaciones angulares de los resultados respecto del valor angular se obtuvo una mínima de un grado y máxima de siete grados[4]. Esta metodología se puede extender a varias fuentes fijas y en movimiento.

En un ambiente acústico no controlado, pueden estar presentes más de una fuente de voz localizadas en diferentes posiciones del recinto y comunicarse entre sí o hablar al mismo tiempo, de tal manera que dificulta la localización de cada una de ellas. Además de la señal emitida por la fuente de voz, también se presentan los rebotes de la misma señal, es decir, las señales reflejadas de menor intensidad y con retardo producidas en las paredes del recinto.

En la sección tres, se explican los diferentes métodos que se utilizan en la localización del DOA, en cuatro los resultados obtenidos en arreglos circulares y al final las conclusiones.

3. Condiciones experimentales

Para el análisis consideramos la metodología de ubicar las fuentes de voz lo suficientemente lejos con respecto al arreglo de micrófonos, el frente de onda se puede considerar en forma plana de acuerdo a la teoría del modelo de campo lejano[5,6,7]:

$$r > \frac{2L^2}{\lambda} \qquad (1)$$

r : distancia radial, λ : longitud de onda, L: longitud del arreglo.

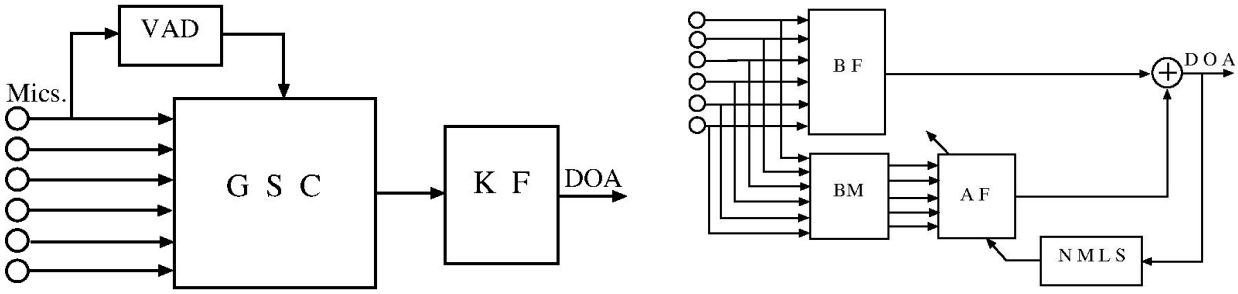
Para la detección de DOA, se han desarrollado diferentes metodologías y algoritmos para la estimación de la dirección de arribo (DOA) de fuentes de voz estáticas, como el método de correlación cruzada generalizada (GCC), sin embargo, su respuesta es pobre cuando se trata de un recinto con reverberación. Las técnicas basadas en la diferencia del tiempo de arribo (TDOA) son estimadas por variaciones de GCC y en conjunto con la transformada de fase (GCC-PHAT)[1,2], utilizadas en audición con robots de servicios y en sistemas de videoconferencias. Otros algoritmos se basan en las características de la matriz de covarianza de las señales adquiridas a través de los micrófonos del arreglo por medio de la eigendescomposición, como es el caso del algoritmo de clasificación de múltiples señales (MUSIC), que puede estimar $M-1$ señales y su respectivo DOA en un arreglo de M micrófonos, con la restricción de utilizarse en señales de banda angosta, esta metodología puede ser útil para fuentes estáticas, ya que la descomposición de matrices conlleva a un gran peso y complejidad computacional y mucho tiempo de proceso, que para el caso de fuentes en movimiento no es conveniente.

La disyuntiva de los métodos de localización de fuentes de voz es que para frecuencias bajas, la apertura del lóbulo principal en el patrón de radiación del formador de haz es muy amplio, lo que dificulta la exactitud de la localización y al mismo tiempo limita el número de fuentes sonoras que pueden ser localizadas[4].

3.1 Sistema

El sistema cuenta con una etapa de adquisición de señales por medio de un arreglo de micrófonos circular, con la tarjeta 8-SoundUSB. Se implementó un detector de actividad de voz (VAD) adaptable, para detectar voz en ambientes ruidosos.

En este trabajo se propone la detección DOA utilizando un bloque BF con el algoritmo GSC con bancos de filtros de la media de los mínimos cuadrados (LMS)[3] y a su salida un estimador con un filtro de Kalman[4], como se observa en las figuras 1 y 2, se muestra el arreglo de micrófonos utilizados en el laboratorio. En trabajos anteriores como en [2] ya hemos obtenidos resultados con el algoritmo GSC y arreglos lineales de micrófonos con fuentes estáticas.



a) Sistema general *b) Algoritmo GSC*

Figura 1. Sistema de estimación de DOA

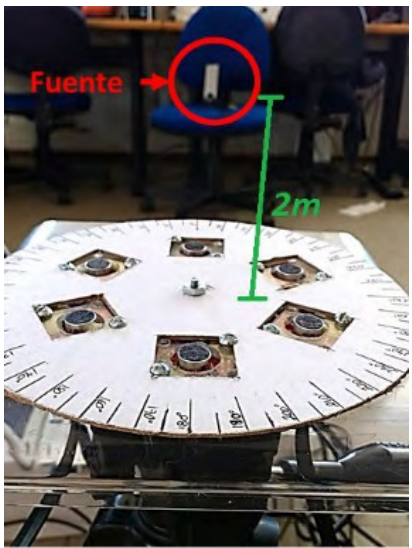


Figura 2. Sistema experimental con arreglo circular de seis micrófonos

3.2 Sistema generalizado de cancelación de lóbulos laterales (GSC)

La estructura mostrada en la figura 1.b consiste de cuatros bloques, un BF fijo para generar una señal de referencia, un bloque de la matriz de boqueo (BM)[4,8] que extrae el ruido no correlacionado con los micrófonos, un algoritmo de filtrado adaptable (AF) para enfatizar el ruido y un bloque de rotroalimentación de la salida que trabaja con el algoritmo LMS normalizado (NLMS)[4] para extracción de parámetro y alimentar al AF.

3.3 Filtrado de Kalman (FK):

El DOA de las señales provenientes de las fuentes de voz se definen como las observaciones O_i en el tiempo t, estas observaciones corresponden a las posibles fuentes estimadas por el algolritmo GSC. En el bloque FK se estima la posición correcta de la fuente, estima el estado $x_t \in R^n$ de un proceso estocástico. El FK corrige la estimación con base a la retroalimentación dada por las mediciones ruidosas. En esta etapa, se calculan el estado a priori $\tilde{x}_t^-$ y la matriz de covarianza $\boldsymbol{P}$, debido a que el estado no se puede observar directamente. La predicción del estado a priori $\tilde{x}_t^-$ se calcula por medio de la expresión[9]:

$$\tilde{x}_t = \mathbf{A}\, x_{t1} + \mathbf{B}\, u_t + w_t \qquad (2)$$

donde **A** es una matriz de transición de estados, **B** una matriz de relación de observaciones, w_t ruido del proceso o de medición y t_1 el tiempo anterior. Tomando la medición:

$$z_t = Hx_t + v_t \quad (3)$$

con v_t ruido, **H** una matriz de transformación que mapea el estado x_t al dominio de la medición z_t.

Las covarianzas se almacenan en la matriz **P,** donde, los elementos de la diagonal principal representan las varianzas asociadas a los parámetros del vector de estado, y los elementos localizados fuera de la diagonal principal representan las covarianzas entre los elementos del vector de estado definida por:

$$\mathbf{P}_t = E\{(x_t - \tilde{x}_t)(x_t - \tilde{x}_t)^T\} \quad (4)$$

La matriz de covarianza a priori $\tilde{P}t^-$ se calcula:

$$\mathbf{P}_t = \mathbf{A}\, P_{t1}\, \mathbf{A}^T + \mathbf{Q}_{t1} \quad (5)$$

donde $\mathbf{Q}_{t1}$ es la matriz de covarianza del ruido del proceso, asociada con las entradas ruidosas.

En la etapa de actualización se proyectan hacia delante (en tiempo) el estado actual y el error de covarianza para obtener una estimación a priori, y en la actualización obtener una estimación a posteriori mejorada [9,10]. La ecuación de corrección del estado (6), calcula la estimación del estado a posteriori $\tilde{x}_t$ como una combinación lineal de una estimación a priori $\tilde{x}_t^-$ y una diferencia ponderada entre la medición actual z_t y la predicción de medición $\mathbf{H}\tilde{x}_t^-$, conocida como medida residual. Tal medida residual refleja la discrepancia entre la medición actual y la estimada:

$$\tilde{x}_t = \tilde{x}_t^- + \mathbf{K}_t (z_t - \mathbf{H}\, \tilde{x}_t^-) \quad (6)$$

Donde la matriz $\mathbf{K}_t$ de tamaño *nxm* es la ganancia de Kalman[4,9,11] y minimiza el error de covariaza, se calcula por la ecuación (7):

$$\mathbf{K}_t = \mathbf{P}_{t^-} \mathbf{H}_t^T / (\mathbf{H} \mathbf{P}_{t^-} \mathbf{H}^T + \mathbf{R}_t) \quad (7)$$

Si la covarianza del error de medición $\mathbf{R}_t$ es pequeña, la ganancia de Kalman será grande, la estimación dará mayor peso a la medida residual. Si el valor de $\boldsymbol{P}_{t^-}$ se aproxima a cero, la estimación del estado $\tilde{x}_t$ se va a aproximar a la estimación a priori del estado $\tilde{x}_{t^-}$.Finalmente, la actualización de la matriz de covarianza del vector de estado a posteriori se calcula por medio de la ecuación (8):

$$\mathbf{P}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{K}_t \mathbf{H}_t) \mathbf{P}_{t^-} \quad (8)$$

donde **I** es una matriz identidad de tamaño *n x n*.

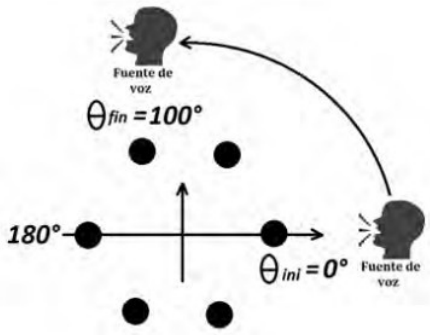
Con esta metodología, se aplica un filtro de Kalman por cada fuente de voz detectadas *j con el algorimo GSC*, de tal manera que las mediciones z_t requeridas en cada filtro, son las observaciones O_{jt} clasificadas con cada una de las fuentes seguidas *j*. El vector de estados está formado por dos elementos, el ángulo de dirección de arribo de la fuente seguida y la velocidad estimada de la fuente seguida en el tiempo *t*. La covarianza del error de medición $\boldsymbol{R}_t$ corresponde al valor de la variación de las muestras.

4. Resultados

Se realizaron experimentos con señales provenientes de fuentes de voz en movimiento, tanto para voces femeninas como masculinas. Las fuentes se adquirieron por medio de un arreglo de micrófonos circular, con seis micrófonos, una frecuencia de muestreo Fs = 44100 *hz*, con distancia entre micrófonos de 4.2 *cms* en el arreglo circular con una separación angular de 60^0 grados, distancia a la fuente de 2*m*. En particular en este trabajo se reportan resultados con una sola fuente en movimiento, sin embargo, con la estimación de Kalman es factible obtener buenos resultados cuando se tiene hasta tres fuentes en movimiento.

4.1 Resultados con el arreglo circular de seis micrófonos

En este caso el intervalo de detección para DOA, es de $0^0 \leq \theta < 360^0$. Con la fuente de voz posicionada en el ángulo inicial $\theta_{ini} = 0^0$ y final $\theta_{fin} = 100^0$. En la figura 1, se muestra el seguimiento de la fuente de voz realizada en 28 segundos, los ángulos estimados fueron $\theta_{ini} = 2^0$ y $\theta_{fin} = 99^0$, y los ángulos $\theta_{ini} = 245^0$ o y el final en $\theta_{fin} = 130^0$. En la figura 4, se observa el seguimiento de la fuente en el intervalo del ángulo de arribo inicial estimado fue en $\theta_{ini} = 237^0$ y el final en $\theta_{fin} = 138^0$. La fuente de voz experimentó una velocidad promedio de 1.61^0/s en sentido horario.



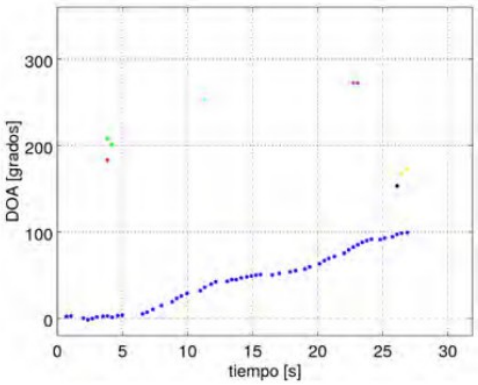


Figura 3. Resultado de movimiento de fuente en intervalo $\theta_{ini}= 2^0$ y $\theta_{fin}= 99^0$

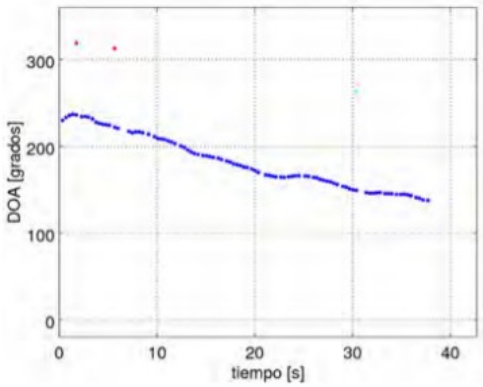


Figura 4. Resultado de movimiento de fuente en intervalo $\theta_{ini}= 237^0$ y $\theta_{fin}= 138^0$

5. Conclusiones

El sistema desarrollado estima la dirección de arribo de señales de voz provenientes de diferentes fuentes posicionadas dentro de un intervalo angular de $0^0 \leq \theta < 360^0$ utilizando un arreglo circular de micrófonos, con un tiempo de respuesta $t = 348ms$. La variación mínima obtenida en las pruebas fue de $\pm 4^0$ y máxima de $\pm 7^0$, dicha variación fue de $\pm 1^0$ con respecto a la media. Esta metodología se puede extender a la detección de dos o tres fuentes fijas o moviéndose simultáneamente y utilizar en aplicaciones con robots en el seguimiento de fuentes de voz.

6. Bibliografía

37. Silva L. A. Localicalizacin de una fuente de voz con arreglo de micrófonos. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2014.

38. Silva L. A. & Escobar S.L. Localización de una fuente de voz con un arreglo mínimo de micrófonos. Congreso de Instrumentación, SOMI XXIX. Puerto Vallarta, Jalisco, México del 29-31 de octubre, 2014. ISSN 2395-8499.
39. Escobar S. L., Silva L. A., Alonso T. E. & Espinosa R.B. Detección y filtrado direccional de señales acústicas. 2do. Congreso Iberoamericano de Instrumentación y Ciencias Aplicadas SOMI XXXI. Cd. de Guatemala, Gua., del 26-28 de octubre, 2016. ISSN 2395-8499.
40. Flores M.A. Estimación de la dirección del ángulo de arribo de un fuente de voz. Tesis de Maestría, Universidad Nacional Autónoma de México, CDMX, 2107.
41. Doclo S. Multi-microphone noise reduction and dereverberation techniques for speech applications. PhD thesis, Katholieke Universiteit Leuven, 2003.
42. Robert J. M. Phased array antenna handbook. Volume 2. Artech House Boston, 2005.
43. Dunn F., Hartmann W., Campbell D., & Flecher N. Handbook of acoustics. Springer, New York, 2015.
44. Duedgeon D. E. Array Signal Processing Concepts and Techniques. Prentice Hall. USA 1993.
45. Welsh G. & Bishop G. An introduction to the Kalman filter. University of North Carolina at Chapel Hill Chapel Hill NC, 95:95041, 1995.
46. Valin J.M., Michaud F. & Rouat J. Robust localization and tracking of simultaneous moving sound sources using beamforming and particle filtering. Robotics and Autonomous Systems, 55(3):216228, 2007.
47. Grondin F., Ltourneau D., Ferland F., Rousseau V. & Michaud F. The manyears open framework. Autonomous Robots, 34(3):217232, 2013.

Numerical determination of voltage potential inside 2D nonhomogeneous media of circular shape using variational method.

Brilla, I., Janíček, F.

[1] Department of Mathematics, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology, Ilkovičova 3, Bratislava, Slovakia.

[2] Institute of Power and Applied Electrical Engineering, Faculty of Electrical Engineering and Information Technology, Slovak University of Technology,

Ilkovičova 3, Bratislava, Slovakia.

e-mail: igor.brilla@stuba.sk, frantisek.janicek@stuba.sk

1. Abstract

The problem of numerical determination of voltage potential inside two dimensional nonhomogeneous media of circular shape using values of the voltage potential on the boundary of

the media has been solved. The convenient form of variational formulation of the problem has been derived. The numerical solution of the problem has been obtained by the method of local variations.

2. Introduction

The paper is dealt with the numerical determination of voltage potential inside two dimensional nonhomogeneous media of circular shape using values of the voltage potential on the boundary of the media. For numerical determination of the problem is used the model described by the potential equation for the nonhomogeneous media with appropriate boundary condition. The convenient form of variational formulation of the problem is derived. For numerical analysis of the problem are applied discrete methods. They are very convenient because in the case of practical problems input data are measured in discrete points. The numerical solution of the problem is obtained by the method of local variations for two dimensional problems[1]. This approach is generalization of the method for numerical determination of voltage potential inside two and three dimensional nonhomogeneous media using values of the voltage potential on the boundary of the media derived in[2]. The convergence of the method of local variations for the problem is proved. The numerical experiments are done from a mathematical point of view. The numerical solutions are computed for different values of electrical conductivities of the media and for different values of the voltage potential on the boundary of the media. The case of discontinuous electrical conductivities is also considered.

3. Formulation of the problem

The following two dimensional potential equation is considered

$$-\left(c\,u_{,i}\right)_{,i} = 0 \qquad \text{in} \quad \Omega\,, \tag{1}$$

where c is an electrical conductivity of the medium, u is a voltage potential. The summation and differentiation rule with respect to indices is applied. Ω is assumed as a two dimensional domain of following form

$$\Omega = \left\{ (x\ ,\ y) \in R^2 : x^2 + y^2 < 1 \right\}$$

it means Ω is the circle with radius one.

For making numerical experiments from the mathematical point of view equation (1) is considered in the following form

$$-\left(c\ u_{,\,i} \right)_{,\,i} = q \qquad \text{in} \quad \Omega \ , \tag{2}$$

where q is a free charge.

The following Dirichlet boundary condition is considered for the voltage potential

$$u(s) = f(s) \ , \quad s' \in' \partial\,\Omega \ , \tag{3}$$

where f represents values of the voltage potential on the boundary.

The equation (2) for two dimensional case can be written in the following form

$$\left(c\ u_{,\,x} \right)_{,\,x} + \left(c\ u_{,\,y} \right)_{,\,y} = -\,q \qquad \text{in} \quad \Omega \ . \tag{4}$$

It is possible to derive similarly as in[3] the convenient form of variational formulation of the problem (4), (3) as the following functional

$$J(u) = \iint\limits_{\Omega} \left[c \left(u_{,\,x} \right)^2 + c \left(u_{,\,y} \right)^2 - 2\,q\,u \right] dx\ dy \ . \tag{5}$$

It is possible to show[3] that the solution of the problem (4), (3) may be characterized as stationary point u of the functional (5).

For the circular domain Ω it is better to transform equation (4) into polar form by the formulas of polar transformation given by

$$x = r \cos\phi \quad , \quad y = r \sin\phi \quad . \tag{6}$$

Using (6) equation (4) is expressed in the form

$$\left(c\, u_{,r} \right)_{,r} + \frac{1}{r^2} \left(c\, u_{,\phi} \right)_{,\phi} + \frac{1}{r} c\, u_{,r} = -q \quad \text{in} \quad \Omega_p \quad , \tag{7}$$

where now

$$\Omega = \Omega_p = \left\{ (r\,,\,\phi) : 0 \le r < 1\,,\ 0 \le \phi \le 2\,\pi \right\}$$

and the Dirichlet boundary condition is expressed in the form

$$u(1\,,\,\phi) = f(1\,,\,\phi) \quad , \quad 0 \le \phi \le 2\,\pi \quad . \tag{8}$$

According to circular shape of domain Ω_p new conditions are appeared in the forms

$$u(r\,,\,0) = u(r\,,\,2\,\pi) \quad , \quad 0 < r \le 1 \quad , \tag{9}$$

$$u(0\,,\,\phi) = u(0\,,\,0) \quad , \quad 0 < \phi \le 2\,\pi \quad . \tag{10}$$

Using (6) functional (5) is expressed in the form

$$J(u) = \iint_{\Omega_p} \left[c \left(u_{,r} \right)^2 + c \left(\frac{1}{r} u_{,\phi} \right)^2 - 2\, q\, u \right] r\, dr\, d\phi \quad . \tag{11}$$

4. Results and discussion

Discrete methods are applied for numerical analysis of the problem. They are very convenient because in the case of practical problems input data are measured in discrete points. On the domain Ω_p is considered grid consist of rectangles $(m+1)\,h_1 \times (n+1)\,h_2$, $h_1>0$, $h_2>0$. The functional J assume following discrete form

$$J \approx I = h_1 h_2 \sum_{i=0}^{m} \sum_{k=0}^{n} I_{i;k} \quad , \tag{12}$$

where

$$I_{i;k} = \left\{ c^{\wedge}_{i;k} \left[\left(u_{,r} \right)^{\wedge}_{i;k} \right]^2 + c^{\wedge}_{i;k} \left[\frac{1}{r^{\wedge}_i} \left(u_{,\phi} \right)^{\wedge}_{i;k} \right]^2 - 2\, q^{\wedge}_{i;k}\, u^{\wedge}_{i;k} \right\} r^{\wedge}_i \tag{13}$$

and

$$r^{\wedge}_i = \left(r_i + r_{i+1} \right)/2 \quad , \tag{14}$$

$$c^{\wedge}_{i;k} = \left(c_{i;k} + c_{i+1;k} + c_{i;k+1} + c_{i+1;k+1} \right)/4 \quad , \tag{15}$$

$$u^{\wedge}_{i;k} = \left(u_{i;k} + u_{i+1;k} + u_{i;k+1} + u_{i+1;k+1} \right)/4 \quad , \tag{16}$$

$$q^{\wedge}_{i;k} = \left(q_{i;k} + q_{i+1;k} + q_{i;k+1} + q_{i+1;k+1} \right)/4 \quad , \tag{17}$$

$$\left(u_{,r} \right)^{\wedge}_{i;k} = \left(u_{i+1;k+1} + u_{i+1;k} - u_{i;k} - u_{i;k+1} \right)/\left(2\, h_1 \right) \quad , \tag{18}$$

$$\left(u_{,\phi} \right)^{\wedge}_{i;k} = \left(u_{i+1;k+1} + u_{i;k+1} - u_{i;k} - u_{i+1;k} \right)/\left(2\, h_2 \right) \tag{19}$$

with the following discrete form of boundary condition (8)

$$u_{m+1;k} = f_{m+1;k} \quad , \qquad k = 0, 1, \ldots, n+1 \tag{20}$$

and conditions (9) and (10)

$$u_{i;0} = u_{i;n+1} , \qquad i = 1, 2, \ldots, m+1 , \tag{21}$$

$$u_{0;k} = u_{0;0} , \qquad k = 1, 2, \ldots, n+1 . \tag{22}$$

Instead of finding the minimum of the functional J now the problem arises to find values $u_{i;k}$ which fulfil the boundary conditions (20) – (22) and such that (12) is minimal. The minimum of (12) is found using the method of local variations[1]. The algorithm of this method is given by a sequence of iterations. It is necessary to start the algorithm with determination of some initial approximation of the values $u_{i;k}$, $i = 0, 1, \ldots, m+1$, $k = 0, 1, \ldots, n+1$ such that the boundary conditions (20) – (22) are fulfilled. The iterative solution is obtained in such a way, that the iteration from the previous step is considered as the initial approximation, and then it is necessary to go through all interior grid points in arbitrary order. At each grid point $(i h_1; k h_2)$ $i = 0, 1, \ldots, m$, $k = 0, 1, \ldots, n$ is computed the value

$$\Phi_{i;k}\left(u_{i;k}\right) = h_1 h_2 \sum_{j_1=0}^{m} \sum_{j_2=0}^{n} \chi_{j_1;j_2} I_{j_1;j_2} , \tag{23}$$

where

$$\chi_{j_1;j_2} = \begin{cases} 1 , & I_{j_1;j_2} = I_{j_1;j_2}\left(u_{i;k}\right) \\ 0 , & I_{j_1;j_2} \neq I_{j_1;j_2}\left(u_{i;k}\right) \end{cases} , \tag{24}$$

which is the collection of such $I_{j_1;j_2}$ from (12) which depends on the value $u_{i;k}$. According (13) - (19) it is possible to rewrite (23) for $i \neq 0$ in the following form

$$\Phi_{i;k}\left(u_{i;k}\right) = h_1 h_2 \sum_{j_1=i-1}^{i} \sum_{j_2=k-1}^{k} I_{j_1;j_2} , \tag{25}$$

where for $k = 0$

$$u_{i;-1} = u_{i;n} \quad , \quad c_{i;-1} = c_{i;n} \quad , \quad q_{i;-1} = q_{i;n} \quad , \quad i = 0, 1, \ldots, m+1 \quad . \qquad (26)$$

Different situation is for $i = 0$ because in this case all points $(0; k h_2) \in \Omega_p$, $k = 0, 1, \ldots, n+1$ represent the only one point $(0; 0) \in \Omega$. According this fact it means according (22) it is possible to rewrite (23) for $i = 0$ in the following form

$$\Phi_{0;0}(u_{0;0}) = h_1 h_2 \sum_{j_2=0}^{n} I_{0;j_2} \quad . \qquad (27)$$

Then is changed a little the value $u_{i;k}$ to the values $u_{i;k} \pm p$, where $p > 0$ is the given step and two corresponding values $\Phi^{+}_{i;k}(u_{i;k} + p)$, $\Phi^{-}_{i;k}(u_{i;k} - p)$ are computed. The new value of the solution at grid point $(i h_1; k h_2)$ is chosen from the values $u_{i;k}$, $u_{i;k} + p$, $u_{i;k} - p$ and it is this one which corresponds to the minimum value of $\Phi_{i;k}(u_{i;k})$, $\Phi^{+}_{i;k}(u_{i;k} + p)$, $\Phi^{-}_{i;k}(u_{i;k} - p)$. The iteration is finished after we have gone through all interior grid points. Then the value of I is calculated for such solution and the process is repeated until the value of I is decreasing. Then it is possible to continue by dividing the step.

We can prove similarly to[4] the following important theorem:

THEOREM. Let the electrical conductivity is piecewise smooth function. Then the method of local variations is convergent for the problem (4), (3).

The program realization of the method of local variations for the problem is elaborated in the programming language Fortran 77.

Numerical experiments are done from a mathematical point of view. This means that at first is constructed the problem with the exact solution, afterwards is computed the numerical solution of this problem using the method of local variations and in the end the computed numerical solution is compared it with the exact one.

The numerical solutions were computed for different values of electrical conductivities of the media and for different values of the voltage potential on the boundary of the media.

For the following voltage potential

$$u = x^2 + y^2 \tag{28}$$

in polar coordinates

$$u = r^2 \tag{29}$$

the homogeneous electrical conductivity

$$c = 2 \tag{30}$$

for corresponding free charge

$$q = -8 \tag{31}$$

using (30), (31) and the boundary conditions constructed from (29), using the program realization of the method of local variations in the Table 1 it is able to see the percentage of errors in the computed solutions in the second column with respect to the exact solutions of the meshes given in the first column. In the third column are reported the numbers of iterations after which the numerical solution is obtained on the given mesh. From the results it is possible to see that small errors are obtained for a course mesh and when the number of grid points increases, errors also increase slightly but are still small.

Tabla 1. Numerical results for the problem (24) - (31)

Mesh	**Percent error (%)**	**Number of iterations**
4 x 8	$2.2\ 10^{-5}$	36
8 x 16	$4.8\ 10^{-4}$	311
16 x 32	$9.3\ 10^{-3}$	1234

For the following voltage potential

$$u = (x + 3) + (y + 3) \tag{32}$$

the nonhomogeneous electrical conductivity

$$c = (x + 3)^2 + (y + 3)^2 \tag{33}$$

for corresponding free charge

$$q = -2(x + 3) - 2(y + 3) \tag{34}$$

in polar coordinates

$$u = r\cos\phi + r\sin\phi + 6 \quad , \tag{35}$$

$$c = (r\cos\phi + 3)^2 + (r\sin\phi + 3)^2 \quad , \tag{36}$$

$$q = -2r\cos\phi - 2r\sin\phi - 12 \tag{37}$$

as it is obvious from the Table 2 the accuracy of computation is not so good as in the previous case. This fact is caused by the discretization error, which is in this case greater than in the previous case. From Table 2 it is seen that when the number of grid points increases, errors decrease.

Tabla 2. Numerical results for the problem (32) - (37)

Mesh	**Percent error (%)**	**Number of iterations**
4 x 8	0.84	117
8 x 16	0.21	374
16 x 32	$5.2\ 10^{-2}$	1511

One way how to obtain better results in this case is to make computations for more grid points. Obtained results can be seen in the Table 3. From the Table 3 can be seen that the errors decrease, however the number of iterations rapidly increase. Second way how to obtain better results is to use better discretization scheme.

Tabla 3. Numerical results for the problem (32) - (37)

Mesh	Percent error (%)	Number of iterations
32 x 64	$1.3\ 10^{-2}$	6097
64 x 128	$3.2\ 10^{-3}$	23131
128 x 256	$5.5\ 10^{-4}$	93513

For another voltage potential

$$u = (x + 3)^2 + (y + 3)^2 \tag{38}$$

the nonhomogeneous electrical conductivity

$$c = (x + 3)(y + 3) \tag{39}$$

for corresponding free charge

$$q = -8(x + 3)(y + 3) \tag{40}$$

in polar coordinates

$$u = (r\cos\phi + 3)^2 + (r\sin\phi + 3)^2 , \tag{41}$$

$$c = (r\cos\phi + 3)(r\sin\phi + 3) , \tag{42}$$

$$q = -8(r\cos\phi + 3)(r\sin\phi + 3) \tag{43}$$

as it is obvious from the Table 4 the accuracy of computation is also now not so good as in the first case. This fact is caused by the discretization error, which is in this case greater than in the previous case. From Table 4 it is seen that when the number of grid points increases, errors decrease.

Tabla 4. Numerical results for the problem (38) - (43)

Mesh	**Percent error (%)**	**Number of iterations**
4 x 8	1.9	231
8 x 16	0.53	524
16 x 32	0.15	1764

One way how to obtain better results in this case is to make computations for more grid points. Obtained results can be seen in the Table 5. From the Table 5 can be seen that the errors decrease, however the number of iterations rapidly increase. Second way how to obtain better results is to use better discretization scheme.

Tabla 5. Numerical results for the problem (38) - (43)

Mesh	**Percent error (%)**	**Number of iterations**
32 x 64	$4.1\ 10^{-2}$	7335
64 x 128	$1.1\ 10^{-2}$	30243
128 x 256	$1.5\ 10^{-3}$	121368

The case of discontinuous electrical conductivities is also considered. For the following discontinuous electrical conductivity

$$c = 2 , \qquad x^2 + y^2 \leq 4/9 , \tag{44}$$

$$c = 2\left(x^2 + y^2 + 1\right) \quad , \qquad x^2 + y^2 \text{ ¿ } 4/9\text{¿} \tag{45}$$

voltage potential

$$u = x^2 + y^2 + 2 \quad , \qquad x^2 + y^2 \leq 4/9 \quad , \tag{46}$$

$$u = 9\left(x^2 + y^2 + 2\right)/13 + 88/117 \quad , \qquad x^2 + y^2 \text{ ¿ } 4/9\text{¿} \tag{47}$$

corresponding free charge

$$q = -8 \quad , \qquad x^2 + y^2 \leq 4/9 \quad , \tag{48}$$

$$q = -72\left[2\left(x^2 + y^2\right) + 1\right]/13 \quad , \qquad x^2 + y^2 \text{ ¿ } 4/9\text{¿} \tag{49}$$

in polar coordinates

$$c = 2 \quad , \qquad r \leq 2/3 \quad , \tag{50}$$

$$c = 2\left(r^2 + 1\right) \quad , \qquad r \text{ ¿ } 2/3\text{¿} \quad , \tag{51}$$

$$u = r^2 + 2 \quad , \qquad r \leq 2/3 \quad , \tag{52}$$

$$u = 9\left(r^2 + 2\right)/13 + 88/117 \quad , \qquad r \text{ ¿ } 2/3\text{¿} \quad , \tag{53}$$

$$q = -8 \quad , \qquad r \leq 2/3 \quad , \tag{54}$$

$$q = -72\left[2\,r^2 + 1\right]/13 \quad , \qquad r \text{ ¿ } 2/3\text{¿} \tag{55}$$

as it is obvious from the Table 6 the accuracy of computation is not so good as in the first case. This fact is also now caused by the discretization error, which is in this case greater than in the previous case. From Table 6 it is seen that when the number of grid points increases, errors decrease.

Tabla 6. Numerical results for the problem (44) - (55)

Mesh	Percent error (%)	Number of iterations
4 x 8	5.47	73
8 x 16	1.79	290
16 x 32	0.31	1212

One way how to obtain better results in this case is to make computations for more grid points. Obtained results can be seen in the Table 7. From the Table 7 can be seen that the errors decrease, however the number of iterations rapidly increase. Second way how to obtain better results is to use better discretization scheme.

Tabla 7. Numerical results for the problem (44) - (55)

Mesh	Percent error (%)	Number of iterations
32 x 64	$1.4\ 10^{-1}$	5088
64 x 128	$4.4\ 10^{-2}$	18790
128 x 256	$9.8\ 10^{-3}$	75468

For another type of discontinuity of electrical conductivity

$$c = 2 \quad , \qquad y \geq 0 \quad , \tag{56}$$

$$c = y + 3 \quad , \qquad y \quad ¿¿ \tag{57}$$

voltage potential

$$u = (\prime x + 3) + (y + 3\prime) \quad , \qquad y \geq 0 \quad , \tag{58}$$

$$u = (\prime x + 3) + 2 \ln (y + 3\prime) - 2 \ln 3 + 3 \quad , \qquad y \quad ¿¿ \tag{59}$$

corresponding free charge

$$q = 0 \tag{60}$$

in polar coordinates

$$c = 2 \quad , \qquad \phi \leq \pi \quad , \tag{61}$$

$$c = r \sin\phi + 3 \quad , \qquad \phi \text{ ¿ } \pi \text{¿} \quad , \tag{62}$$

$$u = r \cos\phi + r \sin\phi + 6 \quad , \qquad \phi \leq \pi \quad , \tag{63}$$

$$u = r \cos\phi + 2 \ln\left(r \sin\phi + 3\right) + 6 - 2 \ln 3 \quad , \qquad \phi \text{ ¿ } \pi \text{¿} \quad , \tag{64}$$

$$q = 0 \tag{65}$$

as it is obvious from the Table 8 the accuracy of computation is not so good as in the first case. This fact is also now caused by the discretization error, which is in this case greater than in the previous case. From Table 8 it is seen that when the number of grid points increases, errors decrease.

Tabla 8. Numerical results for the problem (56) - (65)

Mesh	Percent error (%)	Number of iterations
4 x 8	1.09	115
8 x 16	0.66	488
16 x 32	0.38	1567

Also now one way how to obtain better results in this case is to make computations for more grid points. Obtained results can be seen in the Table 9. From the Table 9 can

Tabla 9. Numerical results for the problem (56) - (65)

Mesh	Percent error (%)	Number of iterations
32 x 64	0.21	7318

64 x 128	0.11	29633
128 x 256	$5.8\ 10^{-2}$	126074

be seen that the errors decrease, however the number of iterations rapidly increase. Second way how to obtain better results is to use better discretization scheme.

5. Conclusion

This paper is dealt with the numerical determination of voltage potential inside two dimensional nonhomogeneous media of circular shape using values of the voltage potential on the boundary of the media. For numerical determination of the problem is used the model described by the potential equation for the nonhomogeneous media with appropriate boundary condition. The convenient form of variational formulation of the problem is derived. The numerical solution of the problem is obtained by the method of local variations for two dimensional problems. The convergence of the method of local variations for the problem is proved. Program realization of the method of local variations is elaborated in the programming language Fortran 77.

The numerical experiments are done from a mathematical point of view. The numerical solutions are computed for different values of electrical conductivities of the media also for discontinuous electrical conductivities of the media and for different values of the voltage potential on the boundary of the media. From computed examples it is seen that obtained accuracy of the computation depends on the discretization errors. One way how to obtain better results is to make computations for more grid points. Second way how to obtain better results is to use better discretization scheme.

This approach is possible to generalize to the problem for numerical determination of voltage potential inside three dimensional nonhomogeneous media for cylindrical shape of the domain using variational methods.

6. Acknowledgements

This publication is the result of the project implementations: "Developing of research and development capacities to ensure a stable supply of electricity following trends in the development of modern means of transport of the 21st century", ITMS code 313010T596 and „Effective control of production and consumption of energy from renewable resources“ ITMS code 26240220093, supported by the Research and Innovation Operational Programme funded by the ERDF."

7. References

48. Černousko F.L., Baničuk N.V., “Variacionnye zadači mechaniki i upravlenija“, Izdateľstvo Nauka, Moskva, 1973.
49. Brilla I., Janíček F., “Numerical Determination of Voltage Potential Inside Nonhomogeneous Media Using Variational Approach“, Trabajos Completos del Congreso CAIP’2019, 21-24 October 2019, Lima, Perú, 857-867 (2019).
50. Rektorys K., “Variační metody v inženýrských problémech a v problémech matematické fyziky“, SNTL, Praha, 1974.
51. Brilla I., “Numerical Determination of Voltage Potential Inside Orthotropic Media Using Variational Methods“, Proceedings of the 11th International Scientific Conference Energy-Ecology-Economy 2012, 15-17 May 2012, Tatranské Matliare, Slovakia, 1-6 on USB key, (2012).

“Uso del pez cebra (Danio rerio) para evaluar la calidad y seguridad del agua renovada como potencial fuente de recarga del acuífero del Valle de México”

Ramos-Ramírez, I. A.1, [IINGEN-UNAM] Chávez-Mejía, A. C.2, [IINGEN-UNAM] Schnabel-Peraza, D. 3, [IBT-UNAM] Magaña-López, R.4, [IINGEN-UNAM]

[1]Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, I.I.U.N.A.M. 1.

[1]Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, I.I.U.N.A.M. 2.

[2]Instituto de Biotecnología, Universidad Nacional Autónoma de México, Campus Morelos. 3.

[1]Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, I.I.U.N.A.M. 4.

IRamosR@iingen.unam.mx;ramosandro55@gmail.com

AChavezM@iingen.unam.mx

denhi.sch@gmail.com

RMaganaL@iingen.unam.mx

1. Resumen

El presente estudio tuvo por objetivo evaluar la calidad y seguridad del agua renovada utilizando tratamientos terciarios avanzados en agua residual tratada por la Planta piloto para

recarga del acuífero “Cerro de la Estrella”. Ello mediante la caracterización y cuantificación cromatográfica de microcontaminantes orgánicos (MCO) y el biomonitoreo de sus unidades de proceso (UP) mediante ensayos de toxicidad aguda DL^{50} y ensayos del comportamiento motor utilizando embriones y larvas de pez cebra (*Danio rerio*). Los resultados indican que el efluente producido por la planta presenta rangos de concentraciones de MCO de bisfenol A (1,198-2,282 ng/L); carbamazepina (89,000 ng/L); nonilfenol (322 ng/L) y triclosán (1,539-2,354 ng/L). Si bien no presenta una dosis letal 50 (DL_{50}) para el agua de salida, si lo hacen para el MCO triclosán a concentraciones de 1000 y 2000 ng/L. Además, los ensayos de comportamiento mostraron trastornos de motilidad sobre el organismo de prueba y no se descartan implicaciones crónicas posteriores, que deberán ser estudiados a detalle para garantizar el uso seguro del agua renovada. Por último, los costos de operación del proyecto de recarga demuestran su rentabilidad económica, por lo que puede ser una alternativa prometedora para solventar la problemática de abastecimiento de agua segura en zonas con poca disponibilidad del recurso a través de la recarga de los acuíferos locales.

2. Introducción

La presencia de microcontaminantes orgánicos (MCO) en agua puede explicarse debido a que estos compuestos químicos poseen una variedad de usos comerciales que incluyen calzado, cremas para el acné, efluentes de hospitales, jabón de manos, pasta de dientes y recientemente en productos plásticos, tal como juguetes, así como para utensilios de cocina [1]. Los procesos convencionales con los que operan las plantas de tratamiento de aguas residuales (PTAR), especialmente los de tipo biológico, y que utilizan lodos activados y desinfección por cloración han resultado ineficientes en la remoción de estos agentes. No obstante, el uso procesos avanzados dentro de las PTAR permiten incrementar la calidad del efluente, e inclusive obtener un agua renovada de calidad adecuada para su reúso urbano, industrial, recreativo y/o potable. Las PTAR existentes en la Zona Metropolitana del Valle de México destinan sus efluentes a cuerpos de agua, agricultura, riego de áreas verdes, usos industriales, reúso urbano y de manera casi nula para la recarga de las aguas subterráneas [2], promoviendo con ello un modelo no sostenible.

Si bien, el uso de agua renovada es una alternativa para sitios con limitación del recurso, esto implica la necesidad de implementar procesos avanzados, que conllevan una inversión considerable para el prestador del servicio, así como garantizar la efectividad del proceso, pero más importante es asegurar un impacto inocuo para los elementos bióticos y abióticos del ecosistema, considerando que el efluente utilizado debe alcanzar estándares operativos superiores a los que comúnmente brindan las PTAR.

2.1 Planta piloto y generación de agua renovada

El Sistema de Aguas de la Ciudad de México (SACMEX), a través de su Unidad Departamental de Investigación Tecnológica inició un proyecto integral para la reinyección de agua al acuífero en el año 2008. Lo anterior, con el propósito principal de recargar el agua renovada y reducir el hundimiento del suelo en la zona de Iztapalapa, dentro de la CDMX, que es un sitio que históricamente ha carecido de agua y muestra desigualdades en cuanto a la calidad y la ración diaria por habitante, en donde el 60% de las zonas cuenta con un suministro de 170 L/hab/día superior al recomendado de 96 L/hab/día, sin embargo, existen otras zonas de la alcaldía sin red de agua entubada ni disponibilidad del recurso que deben solicitarlo mediante pipas o comprar agua

embotellada purificada. Para identificar la viabilidad de la obtención de agua renovada en dicho sitio, se instaló una planta de tratamiento piloto (PTP) de nivel avanzado que está diseñada para un caudal inicial de 0.02 m^3/s, la cual se puede escalar hasta 0.04 m^3/s. La PTP toma como influente el efluente de la PTAR "Cerro de la Estrella" ubicada en la zona de Iztapalapa, la cual opera con tratamientos secundarios (lodos activados y cloración), para posteriormente potabilizarla con el fin de implementar y desarrollar el proyecto de recarga artificial de acuíferos a gran escala [3]. Es decir, ella existe con la finalidad de iniciar la recarga del acuífero, mejorar las características del agua nativa y poder ser utilizada como fuente de suministro de agua potable.

La planta consta de las siguientes unidades de proceso (UP): 1) Coagulación-Floculación del Influente; consiste en la atracción de partículas en suspensión, para posterior sedimentación. 2) Pre-Filtración con sílice; remoción física de material particulado. 3) Ozonización; remoción de color por oxidación de materia orgánica y posterior precipitación, es un proceso terciario de desinfección (no opero durante el estudio). 4) Post-filtración por Zeolita (Adsorción); remoción física de material particulado. 5) Ósmosis Inversa; la filtración por membranas tiene la finalidad de remover los sólidos disueltos totales y de disminuir la conductividad de las sales disueltas en el agua a través de membranas de poliamida con apertura de poro de 0.0005 a 0.002 micras. 6) Desinfección con Luz Ultravioleta (Efluente); radiación del flujo de agua, normalmente a 254 nm, con un efecto germicida.

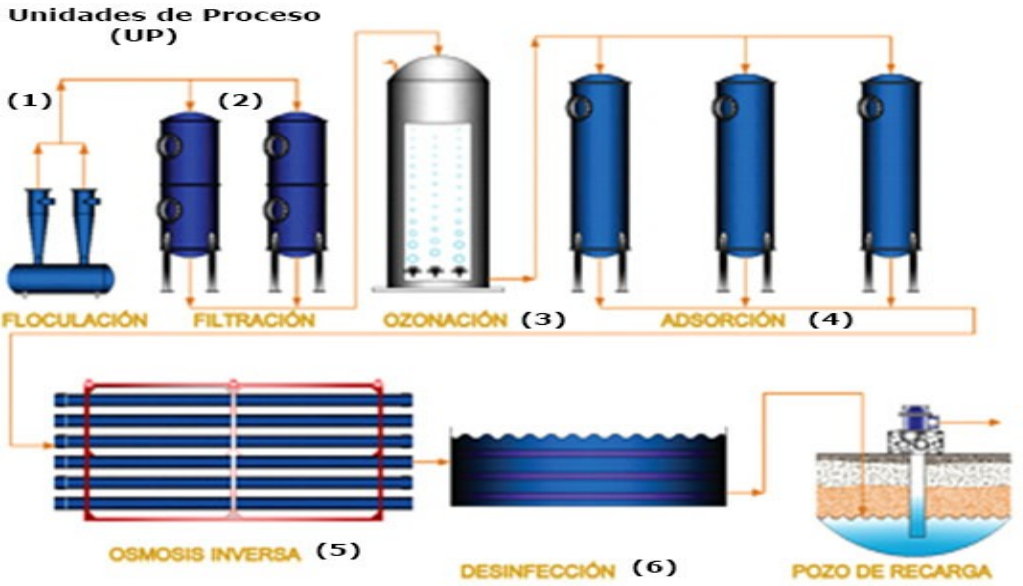


FIGURA 1. ESQUEMA GENERAL DEL TREN DE TRATAMIENTO DE LA PTAR CERRO DE LA ESTRELLA [2].

2.2 El pez cebra (Danio rerio) en bioensayos ecotoxicológicos como herramienta de monitoreo en la gestión del agua renovada

Los bioensayos tienen como objetivo determinar la toxicidad de sustancias o materiales a través del uso de organismos (conocidas como especies centinela), o bien a través de otros organismos que representen fácil manejo como bacterias y algunos invertebrados y vertebrados con órganos y tejidos diferenciados [4]. De hecho, es común su empleo como indicadores de los procesos industriales y en distintas matrices ambientales, existiendo una gran cantidad reportada de

bioensayos para monitoreo, pero desde hace más de una década, la implementación de ensayos que evalúen potenciales efectos en el organismo que no resultan letales, es una tendencia utilizada [4]. En este contexto, el pez cebra es uno de los modelos más reconocidos utilizados al evaluar compuestos farmacéuticos e industriales, metales pesados, y otros efluentes con otros compuestos químicos como los MCO. Dichos estudios, como el ensayo de toxicidad aguda en embriones [5] (*FET*, por sus siglas en inglés) se realizan debido a la transparencia del organismo que permite observar su interior, un tamaño que permite una manipulación dentro de laboratorio que facilita las repeticiones del ensayo, la exposición a los compuestos en volúmenes reducidos y una respuesta de un par de días debido a su ciclo de vida. De manera adicional, su parecido genómico con el humano (70%) [6] hace al pez cebra un excelente modelo para estudios en toxicología. *D. rerio* como modelo ofrece resultados a niveles con alta demanda tecnológica, como alteraciones genéticas y hormonales, reduciendo también el costo del análisis al ofrecer la oportunidad de calificar daños morfológicos y conductuales. A esto último, se ha demostrado que el comportamiento natatorio es una herramienta útil para estudiar la función neuromuscular [7]. Dentro de su desarrollo, los individuos de pez cebra empiezan un movimiento espontáneo (*spontaneous contractions*) alrededor de las 19 a 26 hpf (horas post fecundación), momento en el que aún permanecen dentro del corión. Posteriormente, salen del saco coriónico a las 48 hpf y presentan movimientos natatorios bien determinados y característicos, proporcionando pistas sobre el crecimiento del cerebro y la médula espinal [8][9].

3. Condiciones experimentales

3.1 Caracterización y cuantificación de la carga de MCO por unidad de proceso de la PTP

Para este trabajo, se evaluaron los compuestos: 4-nonilfenol (4-NPH), bisfenol-A (BPA), carbamazepina (CBZ), nonilfenol (NPH) y triclosán (TCS), los cuales se encuentran entre los MCO más comunes en el mundo. Lo anterior, debido a que dichos compuestos son de uso comercial y se han encontrado constantemente en aguas superficiales, subterráneas y residuales [10].

Para ello, se recuperó 1L de la PTP del efluente de cada etapa del proceso (influente, prefiltración, posfiltración, osmosis inversa y desinfección UV) para efectuar los análisis correspondientes. Su determinación se realizó según la técnica de extracción en fase sólida y análisis por cromatografía de gases acoplada a un espectrómetro de masas (GC-MS) y UHPLC, en la cual los analitos fueron extraídos a partir de las muestras modelo mediante su elución con metanol utilizando cartuchos C-18 con 500 mg de fase sólida [10] [11].

3.2 Bioensayos con D. rerio

Los embriones a emplear en el ensayo se obtuvieron a partir de la reproducción de peces cebra adultos (*D. rerio wild-type*) obtenidos en el bioterio del Instituto de Biotecnología, UNAM-Morelos. El ensayo inició dentro del intervalo comprendido a las 2 h posteriores a la puesta, recuperando de manera aleatoria diez embriones para caso

explorado, agrupando y colocando cada grupo de manera independiente en placas de cultivo de fondo plano para facilitar su observación, destacando que cada ensayo de exposición se realizó por duplicado.

Los embriones se expusieron a las muestras de agua de cada efluente de la UP de la PTP mencionada en el apartado 3.1 en un volumen de 300 µl por pozo. En contraste otros grupos de embriones se expusieron en BPA, CBZ, NPH y TCS en concentraciones de 1000ng/L; 2000 ng/L y 90 000 ng/L (esta última solo para la segunda concentración de CBZ) disueltos en agua de acuario; El conjunto de los anteriores MCO en una misma solución con concentraciones de 1000 ng/L originan la Mezcla I con una concentración final de MCO de 4000 ng/L; y con concentraciones de 2000 y 90 000 ng/L originan la Mezcla II con una concentración final de MCO de 96,000 ng/L. El volumen usado en el ensayo fue de 300 µl por pozo (Tabla 1).

TABLA 2. ENSAYOS PARA LA DETERMINACIÓN DE DL50 PARA MCO

# Ensayo	Microcontaminantes orgánicos	CONCENTRACIÓN (ng/L)
Bioensayo 1	Bisfenol A	1000
	Triclosán	
	Nonilfenol	
	Carbamazepina	
	Mezcla I	4000
Bioensayo 2	Bisfenol A	2000
	Triclosán	
	Nonilfenol	
	Carbamazepina	90 000
	Mezcla II	96 000

Los siguientes ensayos realizados fueron acumulativos, es decir están encadenados a los resultados del ensayo inmediato anterior con el objeto de disminuir los sesgos interpretativos.

3.3 Determinación de la dosis letal 50 (DL50)

La Dosis Letal 50, se establece como la cantidad de sustancia necesaria, para provocar la muerte del 50 % del total de individuos expuestos a ella [5]. Cuanto menor sea la cantidad de principio activo requerida para alcanzar la DL50, mayor será la toxicidad del mismo [6]. Para ello, se utilizaron los embriones recuperados en la forma mencionada en el apartado 3.2, empleando como control negativo agua de acuario con el mismo número de embriones en un volumen de 300 µl durante las 72 horas del ensayo, sin recambios de agua para asegurar condiciones estándar necesarias para la viabilidad del ensayo. Al cabo de 72h, concluye el desarrollo embrionario, por lo que se registró el número de embriones muertos (necrosados y/o sin latidos) y vivos (sobrevivencia) monitoreados cada 24, 48 y 72 h. La determinación de la DL50 a las 72 hpf fue realizada usando el método Probit, tal como es recomendado por la EPA de Estados Unidos.

3.4 Ensayo de comportamiento

El ensayo de comportamiento motil [8] fue analizado contabilizando las contracciones espontáneas de los embriones. Para ello, se observaron durante dos minutos bajo un microscopio estereoscópico Nikon modelo 5M2800 con cámara ThorLabs 1545SM para contabilizar y las contorsiones espontaneas de cada embrión por UP y los bioensayos 1 y 2 de MCO (Tabla 1), así como para obtener evidencia en video de las mismas. Las contracciones espontaneas fueron grabadas con ayuda de la cámara, dispuesta en el estereoscopio utilizado y el programa Hypercam 2.29.00, donde por cada cambio de dirección de cabeza-cola se contabilizaba una contracción. Se realizó un análisis de varianza (ANOVA simple) usando el software Statgraphics Centurion XVI.I, seguido de una prueba de medianas de Kruskal-Wallis, para determinar cualquier diferencia significativa entre los embriones de los ensayos analizados y los embriones de control con un nivel de confianza del 95%, mostrados gráficamente mediante un diagrama de caja y bigotes con muesca de mediana.

3.5 Balance económico

Se realizó un análisis costo-beneficio proyectado a 5 años de operación. Para el año cero se contempla inversión de la rehabilitación llevada a cabo por el administrador del servicio en 2016, que asciende a $10,023,776.28 MXN (454,865.95 USD) y la infraestructura para reinyección directa al acuífero calculado en $ 2,500,000.00 MXN (113,446.75 USD). Se determinó el flujo de efectivo acumulado para expresar el Valor Actual Neto (VAN), Tasa Interna de Retorno (TIR), y la relación costo-beneficio (C/B).

El VAN sirvió para generar dos tipos de decisiones: ver si la inversión es efectuable y ver qué inversión es mejor que otra en términos absolutos [12]. Los criterios de decisión se basan en lo siguiente: VAN > 0: la tasa de descuento elegida generó beneficios. VAN

= 0: el proyecto de inversión no generó beneficios ni pérdidas, por lo que su realización resultará indiferente. VAN <0: el proyecto de inversión generó pérdidas, por lo que deberá ser rechazado. La TIR está estrechamente relacionada con el VAN, en este caso si el porcentaje es positivo el proyecto se acepta, mientras que en caso contrario si el resultado es negativo es rechazado. Como tal la relación C/B debe de ser ≥ a 1 para aceptar el proyecto, mientras que debe ser rechazado si su valor es <1 [13].

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización y cuantificación de la carga de MCO por unidad de proceso

Los niveles detectados de MCO se encontraron en el intervalo de 357- 89,000 ng/L, tanto en el influente como en los efluentes de las unidades de proceso (UP). Los resultados muestran una remoción que va desde 0.9 a 53% a lo largo del tren de tratamiento, aunque si existe una disminución de su concentración posterior al tratamiento con membranas de osmosis inversa (OI) (53%) y desinfección UV (39.9%), las anteriores no son concordantes con los porcentajes de remoción reportados para procesos de tratamiento con membranas de OI, nanofiltración (NF) y ultrafiltración (UL), en las cuales se mencionan eficiencias de remoción superiores al 80% [14]. Existe también un incremento de la concentración en algunas UP, como posfiltración y desinfección, que no son consecuentes con el tren de tratamiento. Ello puede deberse a particularidades en cada unidad de proceso evaluada, la cual pudo derivarse de cuestiones operacionales y/o por falta de mantenimiento, tal como se muestra en la Tabla 2.

Tabla 2. Cuantificación de Micro contaminantes orgánicos (MCO) por unidad de proceso (UP).

UP	Triclosán		Bisfenol A		4 Nonilfenol		Nonilfenol		Carbamazepina
[ng/L]	Media	Min- Max	Media	Min- Max	Media	Min- Max	Media	Min- Max	Media
Influente	2298	1239-3918	1675	1140-3083	0.309	0.192-0.394	353	-LD	44810
Prefiltración	1949	1622-2705	1431	1226-1544	0.322	0.239-0.427	440	-LD	30660
Posfiltración	2612	1720-3212	1761	1427-2083	0.4	0.266-0.582	223	-LD	45830
O. Inversa	1461	1276-1822	1335	913-2162	0.275	0.229-0.303	322	-LD	50270
Desinfección	1810	1539-2354	1755	1198-2282	0.281	0.171-0.0347	ND	-LD	89000
Rechazo	1949	1455-2377	1353	1039-2091	0.322	0.156-0.455	518	357-773	45220

LD: Límite de detección; Min= Valor mínimo; Max= Valor máximo

4.2 Ensayos de mortalidad y determinación de DL50

Los embriones sometidos al agua de las UP mostraron una mortalidad menor al 50% a las 24, 48 y 72 hpf, mientras que el control se mantuvo por debajo del 15 % de mortalidad durante todo el ensayo, apuntando con ello a que existe un efecto de los agentes expuestos sobre la mortalidad de los embriones. Con base a los resultados no se encontró una mortalidad mayor al 50% de los individuos dentro de las etapas de UP de la PTP al registrar valores similares de mortalidad que se encontraron entre 36-47%, con una media de 42%. Por lo tanto, las primeras 24 horas de exposición no fueron determinantes en la mortalidad, mientras que a las 72 hpf los bioensayos de toxicidad aguda para las muestras de agua reflejaron resultados de mortalidad acumulativa cercanos, pero no absolutos al 50% (Tabla 3; Figura 2).

Tabla 3. Porcentaje de Mortalidad de las unidades de proceso a las 72 hpf determinado por el Método Probit.

U. Proceso	log(C%)	Probit (P)	DL50	% Mortalidad
Efluente	0.7	4.1283652	5	41%
O.Inversa	0	3.5943691	5	36%
Posfiltración	1.1	4.4425775	5	44%
Prefiltración	1.3	4.7170808	5	47%

Influente	1	4.3677734	5	44%
Unidad concentradora de la ósmosis inversa				
Rechazo	0.9	4.1435429	5	41%

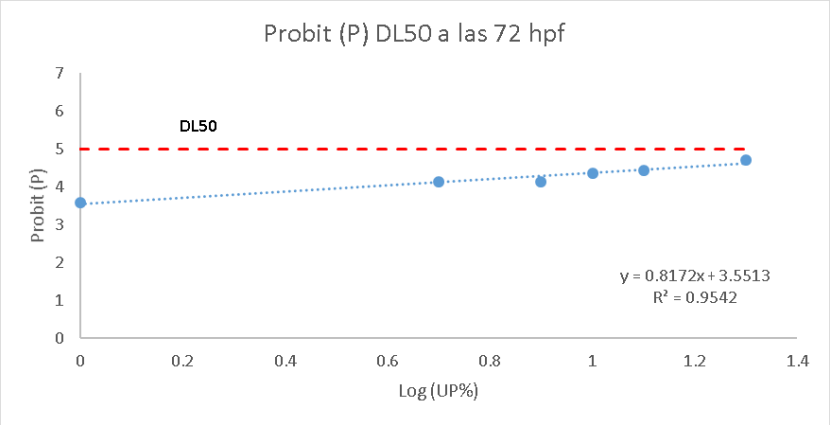


Figura 2. Método Probit para determinar DL_{50}. ninguna Unidad de Proceso decrece al 50 % del total de embriones.

Los ensayos de BPA, CBZ, NPH, TCS y Mezcla I a una concentración de 1000 ng/L presentaron una toxicidad entre 25-30% a las 24 y 48 hpf, aunque si presentaron un retraso en el desarrollo embrionario, ya que a las 24hpf se debe distinguir la segmentación de las tres áreas: cabeza, torso y cauda, sin embargo, se registraron individuos desde las 4 somitas a las 25 somitas que indican un retraso claramente visible en los pozos evaluados con TCS y la Mezcla I. A las 72 hpf, los valores mostraron poca supervivencia en embriones expuestos en esos mismos pozos (TCS y la mezcla con un 52 y 68% de mortalidad, respectivamente) (Figura 3).

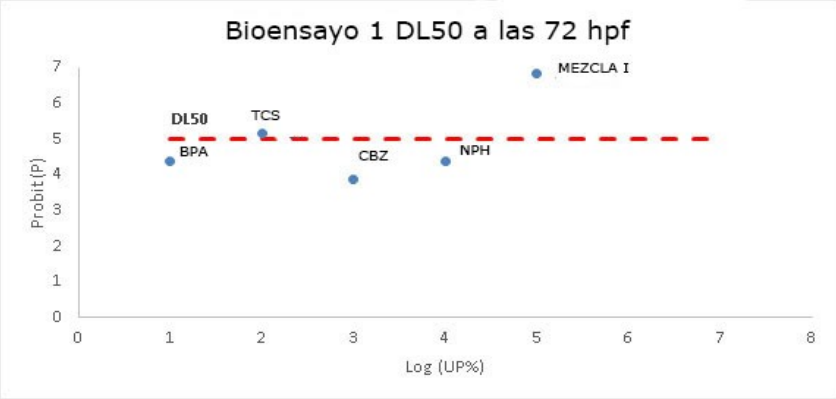


FIGURA 3. MÉTODO PROBIT PARA DETERMINAR DL_{50}. A UNA CONCENTRACIÓN DE 1000 NG/L PARA BISFENOL A (BPA), CARBAMAZEPINA (CBZ), NONILFENOL (NPH) Y TRICLOSÁN (TCS); 4000 NG/L PARA LA MEZCLA I.

La determinación de la DL50 a una concentración de 2000 ng/L mostró una toxicidad del 100 % para TCS y la Mezcla a las 48 hpf; y del 52 y 54% para NPH y BPA a las 72 hpf con retrasos en el desarrollo embrionario en los individuos sobrevivientes para NPH (Figura 4). Por su parte, la DL50 a las 48 hpf para CBZ obtuvo un porcentaje de mortalidad del 3% pese a la elevada concentración de 90000 ng/L, a las 72 hpf el porcentaje de sobrevivencia final fue del 47%, y de 54% para NPH (Tabla 4). Lo anterior indica que los bioensayos 1 y 2 realizados en agua sintética dopada con MCO, si presentan porcentajes de mortalidad que rebasaron el 50% al cabo de 72 hrs, excepto para CBZ. Al compararlo con el ensayo de toxicidad aguda de las UP, en donde no se determinó una DL50, lo anterior puede ser una consecuencia de un comportamiento diferente entre la interacción de otros compuestos orgánicos e inorgánicos que están presentes en las muestras reales de la planta piloto.

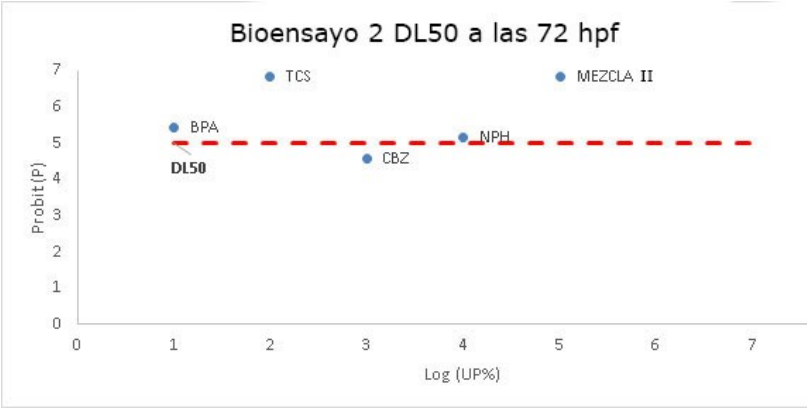


FIGURA 4. CURVA DE MORTALIDAD A LAS 72 HPF DE MCO´S A UNA CONCENTRACIÓN DE 2000 NG/L PARA BISFENOL A (BPA), TRICLOSÁN (TCS) Y NONILFENOLES (NPH); 90000 PARA CARBAMAZEPINA (CBZ); 96 000 PARA LA MEZCLA II.

TABLA 4. PORCENTAJE DE MORTALIDAD DE LOS MCO EVALUADOS A CONCENTRACIONES SEGÚN BIOENSAYO 2 A LAS 72 HPF DETERMINADO POR EL MÉTODO PROBIT.

Bioensayo 2				
MCO	**log(C%)**	**Probit (P)**	**DL50**	**Mortalidad (%)**
Bisfenol A	0.6	5.4307273	5	54
Carbamazepina	0.33	4.5692727	5	46
Nonilfenoles	0.56	5.167894	5	52
Triclosán	0.96	1.00	5	100
MEZCLA II	0.96	1.00	5	100

En consecuencia y con base a las condiciones en donde la exposición a los MCO se efectuó de manera aislada con agua dopada, los resultados muestran una elevada toxicidad para las concentraciones del bioensayo 2 (2000 ng/L y Mezcla II) (Tabla 4), logrando un 100% de mortalidad para TCS y Mezcla II. La mortalidad para el control se mantuvo entre 0-20%, Por otro lado, una comparación entre la mortalidad registrada al cabo de 72 hpf, para las concentraciones versus el control evidencia que la mortalidad se incrementa con el aumento de concentración y el tiempo de exposición de los MCO analizados. Estos estudios reflejan así efectos tóxicos a rangos de concentración menores a los previamente publicados, empleando el mismo organismo de prueba [15] [16], los resultados confirman que las pruebas de embriones de peces son equivalentes a las pruebas de toxicidad aguda para peces adultos y brindan un fuerte respaldo científico para el FET como sustituto de la prueba de toxicidad aguda con peces adultos, pero con la gran ventaja de llevarse a cabo en un menor tiempo de procesamiento [15].

4.3 Ensayo de Comportamiento Motil

Las contorsiones espontáneas de cabeza-cola de los embriones de *D. rerio* disminuyeron significativamente después de 24 h en los ensayos de las unidades de proceso en comparación con los controles, con la excepción de la posfiltración y osmosis inversa que no mostraron diferencia (Figura 5). Efluente, rechazo, prefiltración e influente causaron el menor número de contracciones promedio en los embriones (4.9, 4.9, 5.7 y 6.4, respectivamente), mientras que los controles presentaron una media de 9.8 contracciones luego de dos minutos. Las contracciones espontáneas nunca se detienen por completo y probablemente sean la causa final de la eclosión [8] [12], convirtiéndose en un comportamiento clave para el desarrollo de *D. rerio.*

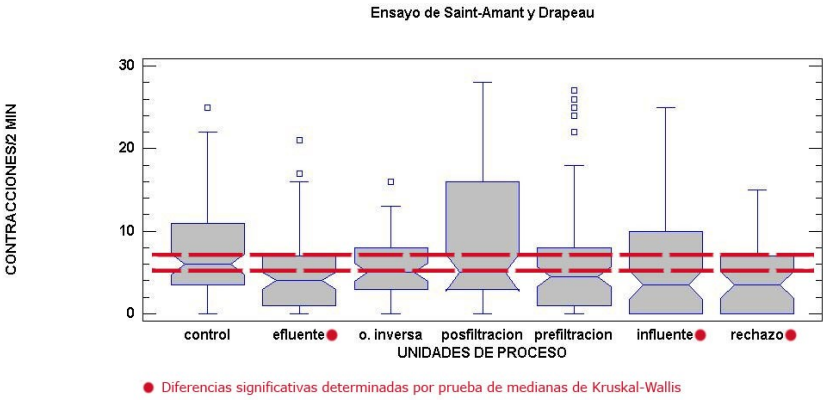


FIGURA 5. DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES QUE MUESTRA DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DETERMINADAS POR PRUEBA DE MEDIANAS DE KRUSKAL-WALLIS PARA LOS EMBRIONES EXPUESTOS A LAS UNIDADES DE PROCESO (UP) DE LA PLANTA DE TRATAMIENTO PILOTO (PTP) EN EL ENSAYO DE COMPORTAMIENTO.

Las contorsiones espontáneas de cabeza-cola de los embriones de pez cebra presentan diferencias después de 24 h en los bioensayos 1 y 2 evaluados con las concentraciones mencionadas en la Tabla 2, en comparación con los grupos control. El ensayo control presenta una media de 1-2 contracciones cada 3-5 segundos, con una media de 10 a 30 contracciones al cabo de los dos

minutos que dura el ensayo [8]. Los grupos control para el bioensayo 1 se encuentran dentro de la media normal que postula el ensayo con 15.3 contracciones en dos minutos. Sin embargo, los embriones tratados con TCS y Mezcla I presentaron de 1 a cero contracciones durante el ensayo de comportamiento, donde ello significa que las contracciones se encuentran prácticamente inexistentes, y comprometen la capacidad de los embriones para salir del corión y continuar su desarrollo. Por su parte, CBZ también presentó un menor número de contracciones en los embriones con 7.0 contracciones cada dos minutos, con ello presentando diferencias significativas de acuerdo a la prueba de medianas de Kruskal-Wallis con respecto al control. Los ensayos con BPA y NPH no tuvieron diferencias significativas (Figura 6).

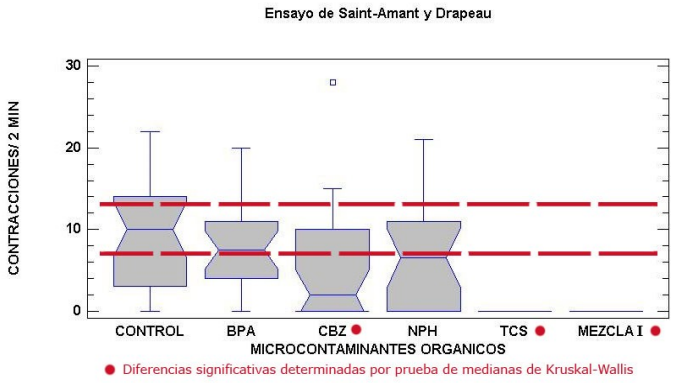


FIGURA 6. DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES QUE MUESTRA DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DETERMINADAS POR PRUEBA DE MEDIANAS DE KRUSKAL-WALLIS PARA LOS EMBRIONES EXPUESTOS A BISFENOL A (BPA), CARBAMAZEPINA (CBZ), NONILFENOLES (NPH), TRICLOSÁN (TCS) Y MEZCLA I, DEL BIOENSAYO 1.

Por su parte, para el bioensayo 2, los embriones tratados con TCS y la Mezcla II no presentaron contracciones durante el ensayo de comportamiento, significando así, que las contracciones se encuentran totalmente inhibidas debido a la exposición de estos contaminantes. La CBZ tuvo una media de contracciones de 1.0 cada dos minutos, presentando diferencias significativas de acuerdo a la prueba de medianas de Kruskal-Wallis con respecto al control, BPA y NPH como se muestra en la Figura 7.

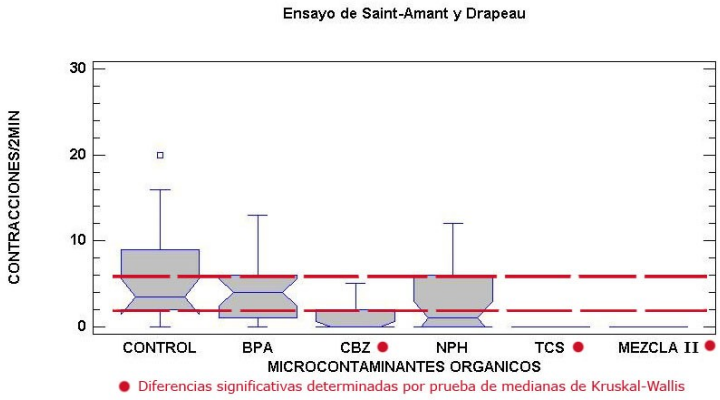


FIGURA 7. DIAGRAMA DE CAJA Y BIGOTES QUE MUESTRA DIFERENCIAS SIGNIFICATIVAS DETERMINADAS POR PRUEBA DE MEDIANAS DE KRUSKAL-WALLIS PARA LOS EMBRIONES EXPUESTOS A BISFENOL A (BPA), CARBAMAZEPINA (CBZ), NONILFENOLES (NPH), TRICLOSÁN (TCS) Y MEZCLA II, DEL BIOENSAYO 2.

Las observaciones realizadas sugieren que las contracciones espontáneas resultan de la activación de un circuito espinal primitivo [8]. Esto quiere decir, que la médula espinal parece ser el lugar para el desarrollo precoz de las funciones locomotoras de vertebrados, mientras que el tacto y la natación requieren entradas adicionales del cerebro posterior para provocar comportamientos locomotores maduros [15]. El análisis de la motilidad mostró que los hitos del desarrollo del embrión de pez cebra se pueden utilizar para realizar análisis de comportamiento. Se documentó un decremento en los movimientos espontáneos de la cabeza y la cola en los embriones de *D. rerio* tratados. Estas contracciones espontáneas se asociaron con características de movimiento de tipo epiléptico descritas en el pez cebra, tales como espasmos, nerviosismo y temblor [17] que pudieran estar suprimidas por la carga de MCO presentes en el agua generada [16]. No es posible atribuir responsabilidad a un solo contaminante ya que estos se encuentran en forma de mezcla mixta a concentraciones variables en las UP de la PTP, pero para los ensayos con agua dopada, TCS y Mezcla I y II muestran similitudes en resultados.

5. Balance económico: Costos y ventajas obtenidas

En términos prácticos son difíciles de cuantificar los beneficios y los costos de estos conceptos, ya que el reúso debe incluir los costos de post-tratamiento de acuerdo con los requerimientos técnicos y normativos para cada uso específico que se pretenda darle, además de los de conducción del agua tratada hasta el sitio de reúso. En este caso, debido a las restricciones de información que se tuvieron a lo largo del proyecto, solo se toman en cuenta los costos post-tratamiento, costo de la inyección a pozo para un módulo piloto y el costo anual de operación como valor de producción, tomando en cuenta que se cumple el requerimiento técnico y normativo (Tabla 5).

TABLA 5. ANÁLISIS DE COSTOS POR M^3 DE AGUA RENOVADA PRODUCIDA, AGUA DE POZO EXTRAÍDA Y COSTO ASOCIADO A LA INFRAESTRUCTURA PARA LA INYECCIÓN DIRECTA, A UNA TSD DEL 10%.

Concepto	Requerimientos

Costo de Agua de la Planta piloto ($)	5.60 MXN (0.25 USD)	
Costo de agua de pozo ($)	12.00 MXN (0.54 USD)	
Costo m^3 total ($)	6.40 MXN (0.29 USD)	
m^3/año	1,261,440	630,720
Caudal	0.040 m^3/ s	0.020 m^3/ s
Costo anual ($)	8,073,216 MXN (366352.05 USD)	4,036,608 MXN (183,176.03)
Infraestructura para la inyección directa al pozo ($)		2,500,000 MXN (113,446.75 USD)
TSD	10%	

Una vez cuantificados y valorados los costos, se procedió a calcular la rentabilidad del proyecto, considerando una Tasa de Depreciación Social (TSD) del 10%, para lo cual se elaboró el flujo de evaluación del mismo a 5 años, y se calculó el Valor Actual Neto (VAN), la Tasa Interna de Retorno (TIR) y la relación Costo-Beneficio (C/B). Como resultado se obtuvo un VAN=$ 21,539,143.50 (977,418.35 USD) y TIR= %18 valores que son positivos, lo que garantiza la rentabilidad del proyecto. Además, la relación Costo/Beneficio (C/B) es mayor a uno (1.66) demostrando que el proyecto es factible.

Era congruente y lógico considerar que su valor resultaría negativo, ya que una planta de tratamiento de agua residual no tiene ventas tangibles como tal. Sin embargo, la justificación de este resultado para una inversión de este tipo, radica en la sostenibilidad que generara con los años y la que se estima a corto plazo (5 años), resultando un negocio rentable y atractivo para el prestador del servicio a partir del cuarto año de operación. No obstante, la oportunidad de reinvertir en el proyecto estará condicionada a la priorización que el administrador del servicio haga del proyecto, y en sí mismo, cuando los beneficios ambientales de recargar al acuífero de forma directa se hagan visibles.

Una forma en la que la C/B para reinyección del acuífero sea mayor a corto plazo consiste en otorgar el derecho al recaudador de aumentar la concesión en proporción a los volúmenes infiltrados, y/o establecer que un porcentaje de la recaudación por uso, aprovechamiento o explotación, el cual se destine al estudio, manejo y recarga del acuífero [18]. Este porcentaje se convertiría en un ingreso que mejoraría, aún más, la rentabilidad de este tipo de proyectos.

6. Conclusiones

El comportamiento del tren de tratamiento con respecto a la cuantificación de MCO, debe describirse como variable, ya que se registran aumentos de concentración respecto a la UP de O.I. y en la desinfección, siendo que esta última un tratamiento foto catalítico que debería degradar TCS y BPA, observando un incremento para todos los MCO en alguna unidad de proceso. Dicho comportamiento probablemente se relacione con la falta de operación de la unidad de proceso de ozonización, aumentando la carga de especies orgánicas en el tratamiento posterior, pudiendo provocar saturación de las membranas de O.I. por adsorción de materia orgánica, incrustaciones salinas y/o crecimiento de biopelícula, provocando así un azolvamiento del sistema.

Con base en lo anterior, la adsorción podría provocar la acumulación significativa en la superficie de la membrana que podría disminuir su potencial de retención y aumentar su volumen de MCO, derivando en su posible ruptura y la liberación de la carga retenida.

En cuanto a los bioensayos, los efectos demostraron ser no letales para 24 hpf, mientras que los realizados con agua sintética dopada con MCO presentan porcentajes de mortalidad que superaron el 50% al cabo de 72 hrs, e inhibición de las contracciones a las 24hrs con efectos crónicos en el comportamiento. Dicho comportamiento sugiere ser consecuentica de la interacción de otros compuestos orgánicos e inorgánicos presentes en las muestras reales de la PTP en comparación con las muestras sintéticas con parámetros controlados.

Dada la presencia de MCO conocidos como disruptores endocrinos (compuestos capaces de alterar el sistema endocrino), se recomiendan más ensayos para conocer si hay efectos en la línea germinal y la determinación del sexo de los organismos. De existir, pudieran comprometer de forma seria la calidad y seguridad del agua renovada producida, ya que la exposición a baja dosis de sustancias que interactúan con los receptores hormonales pueden interferir con la reproducción, el desarrollo y otros procesos regulados hormonalmente.

Por último, los costos de operación del proyecto de recarga demuestran su viabilidad económica, ya que representan montos similares o menores por m^3 a los que actualmente se invierten para la potabilización y extracción de agua de pozo.

7. Agradecimientos

Isaac Alejandro Ramos Ramírez desea agradecer al PAPIIT por el apoyo recibido para la realización del proyecto: “Uso del pez cebra para evaluar la calidad y seguridad del agua renovada como potencial fuente de recarga del acuífero del Valle de México” IN200618. Y al CONACyT por el apoyo recibido para la realización de estudios

de maestría en el II-UNAM a través del Posgrado en Ciencias de la Sostenibilidad, UNAM.

Rafael Magaña López desea agradecer a la beca DGAPA y CTIC por el apoyo recibido para la realización de estudios Posdoctorales en el II-UNAM.

8. Bibliografía

52. Tierney, Keith B., Anthony P. Farrell, and Colin J. Brauner, eds. Fish Physiology: Organic Chemical Toxicology of Fishes. Academic Press, 2013.
53. Rodríguez Romero, Abrahan Daniel, and Wendy Nathaly Sangucho Loachamin. *Evaluación de la viabilidad del uso del raquis como lecho filtrante para el tratamiento de agua residual proveniente de la extracción de aceite de palma*. BS thesis. Quito, 2018., 2018.
54. Sistema de Aguas de la Ciudad de México, & Sanchez-Vidal, D. (2017, enero 1). Plan de Acciones para mejorar los servicios de agua en Iztapalapa Abril 2016. Recuperado 21 de abril de 2020, de https://slideplayer.es/slide/10372185/.
55. Wang, Faming, et al. Chemical and ecotoxicological analyses of sediments and elutriates of contaminated rivers due to e-waste recycling activities using a diverse battery of bioassays. *Environmental Pollution*, 2009, vol. 157, no 7, p. 2082-2090.
56. Organisation de coopération et de développement économiques. Test No. 236: Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test. OECD Publishing, 2013.
57. Solis Soledad. “Alteraciones en el desarrollo embrionario del pez cebra por exposición a muestras del río Atoyac y descargas industriales”. Universidad Nacional Autónoma de México, 2013
58. Lammer, E., Carr, G. J., Wendler, K., Rawlings, J. M., Belanger, S. E., & Braunbeck, T. Is the fish embryo toxicity test (FET) with the zebrafish (Danio rerio) a potential alternative for the fish acute toxicity test?. Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology, 149(2), 196-209 (2009).
59. Saint-Amant, Louis, and Pierre Drapeau. "Time course of the development of motor behaviors in the zebrafish embryo." Journal of neurobiology 37.4 (1998): 622-632.
60. Goody, Michelle F., and Clarissa A. Henry. "Motility assay for zebrafish embryos." *Bio Protocol* 3 (2013): e787.Tailing B., Krivenko P., “Blast Furnace Slag- The Ultimate Binder”, Chapter 5, Waste Materials used in Concrete Manufacturing. William Andrew Publishing Noyes, 1997.
61. Jiménez B., Chávez A., Gibson R., Becerril JE., Landa O. Complemento de la Caracterización del Agua de Consumo Humano en el Valle de Tula. Primer Informe. Proyecto del fideicomiso 1928. 94 pp. 3 de septiembre de 2007.
62. Sodré, F. F., Locatelli, M. A. F., & Jardim, W. F. Occurrence of emerging contaminants in Brazilian drinking waters: a sewage-to-tap issue. *Water, Air, and Soil Pollution*, *206*(1-4), 57-67 (2010).
63. Gonzalez Guadarrama, Rosa, and Carlos Eduardo Barrera Díaz. "Evaluación tecnico-economica de propuestas en procesos para Potabilizar Agua en una Planta Tratadora de Agua Química Residual cumpliendo con la NOM-127-SSA1-1994." (2013).
64. Wright, H. B., and W. L. Cairns. "Desinfección de agua por medio de luz ultravioleta." Trabajo presentado en los Anales simposio OPS: Calidad de agua, Desinfección efectiva. 1998.
65. Li, S. Z., Li, X. Y., & Wang, D. Z. Membrane (RO-UF) filtration for antibiotic wastewater treatment and recovery of antibiotics. Separation and Purification Technology, 34(1-3), 109-114 (2004).

66. Embry, M. R., Belanger, S. E., Braunbeck, T. A., Galay-Burgos, M., Halder, M., Hinton, D. E., ... & Whale, G., The fish embryo toxicity test as an animal alternative method in hazard and risk assessment and scientific research. Aquatic toxicology, 97(2), 79-87 (2010).
67. McGrath, P., & Li, C. Q. Zebrafish: a predictive model for assessing drug-induced toxicity. *Drug discovery today*, *13*(9-10), 394-401 (2008).
68. Kimmel, C. B., Patterson, J., & Kimmel, R. O., The development and behavioral characteristics of the startle response in the zebra fish. Developmental Psychobiology, 7, 47–60 (1974).
69. Solis, Rebeca Judith Gonzales. "Mercados potenciales y beneficios del uso de agua residual tratada en la ciudad de Tijuana, Baja California." (2010).

Digestión anaeróbica para la producción de fitorreguladores: efecto del pH inicial y caracterización microbiana del proceso

Castro-Ramos, J. J., Solís-Oba M.M., Calderón Vázquez C.L., Castro-Rivera R., Romero-Rodríguez A., Juárez-Rangel A., Pacheco-Ortiz J.A.

1. Resumen

En esta investigación se evaluó la producción de ácido indolacético (IAA), ácido giberélico (GA_3) y ácido abscísico (ABA) durante la digestión anaeróbica (DA) de estiércol de vaca en dos procesos, DA1 y DA2 a pH inicial de 5.5 y 7.5 respectivamente y 37°C. Además, se caracterizaron taxonómicamente las poblaciones microbianas a los 0, 4, 8 y 20 días de proceso de digestión por medio de análisis metagenómico. Los resultados mostraron diferencias en la producción de IAA y GA_3 entre DA1 y DA2 mientras que el ABA no fue detectado. En ambos procesos disminuyó el pH del medio y se detectó la acumulación de ácidos grasos volátiles ocasionando la acidificación de las DA, además de que no se produjo metano; por lo que en los dos procesos predominó la fase acidogénica. La caracterización taxonómica mostró la presencia de 14 taxones a nivel familia siendo el más abundante inicialmente *Ruminococcaceae* mientras *Peptostreptococcaceae* incrementó su abundancia y predominó en ambas DA.

2. Introducción

La digestión anaeróbica (DA) es un proceso de degradación microbiana de la materia orgánica comúnmente utilizado para el tratamiento de residuos orgánicos y la producción de biogás [1]. Durante este proceso se producen diversos compuestos derivados del metabolismo microbiano, entre los que se encuentran los fitorreguladores [2], los cuales son compuestos que regulan el desarrollo y crecimiento de las plantas [3]. Entre los fitorreguladores se encuentran el IAA, GA_3 y ABA los cuales participan en la regulación de la extensión radicular [4], la inducción de la germinación [5] y la adaptación a acondiciones de estrés [6] respectivamente. Los fitorreguladores son utilizados en la agricultura y en el cultivo de tejidos vegetales debido a su efecto en las plantas [7].

A escala industrial los fitorreguladores como el IAA, GA_3 y ABA son producidos en sistemas de fermentación aeróbicos con cultivos axénicos y utilizando sustratos puros [8]. A pesar de que la producción de fitorreguladores en procesos de fermentación aeróbicos ha sido ampliamente reportada, la información con respecto al proceso anaeróbico es limitada. Sin embargo, existen antecedentes de la presencia de fitorreguladores en el digestato proveniente de la DA de diferentes residuos. Por ejemplo, Ertani y col. (2013) [9] reportaron la presencia de IAA en una concentración de 0.006 mg/L en el digestato de la DA de estiércol de vaca, además evaluaron el efecto del digestato en plántulas de maíz encontrando que aumentó el peso fresco de raíces de las plántulas atribuyendo el efecto al IAA contenido en el digestato. De forma similar, Scaglia y col. (2015) [10] también reportaron el contenido de 9.94 mg/L de IAA en el digestato de la DA de estiércol de cerdo a 37 ºC, concluyendo que el IAA del digestato promovió el enrraizamiento en semillas de pepino. Por su parte, Xin y col. (2016) [2] realizaron el seguimiento de la producción de IAA, GA_3 y ABA durante las DA a 37 ºC de estiércol de vaca (pH 8.68), estiércol de pollo (pH 8.41) y estiércol de cerdo (pH 8.41), inoculados con lodos de depuradora de aguas residuales, encontrando que los tres fitorreguladores se producen en las tres DA variando su concentración en todo el proceso. Estos investigadores también argumentan que el IAA en las DA evaluadas podría haberse producido a partir de triptófano por bacterias del género *Clostridium*.

En esta investigación se evaluó el efecto de la modificación del pH inicial sobre la producción de fitorreguladores y las poblaciones microbianas durante el proceso de DA de estiércol de vaca.

3. Condiciones experimentales

3.1 Digestiones anaeróbicas

Se realizaron dos procesos de DA modificando el pH inicial a 5.5 (DA1) y 7.5 (DA2), manteniendo una temperatura de operación de 37 ºC en ambos casos. Se utilizó estiércol de vaca ajustado a 7 % de sólidos totales como sustrato e inóculo. Cada proceso de DA se llevó a cabo utilizando un lote de 18 botellas serológicas de 120 mL con un volumen de operación de 70 mL. Cada botella serológica se tomó como una repetición y se descartaron tres de estas en cada tiempo de muestreo (4, 8, 12, 16 y 20 días) para realizar la determinación de pH, IAA, GA_3, ABA, AGVs (ácido acético, ácido propiónico, ácido isobutírico, ácido butírico, ácido isovalérico y ácido valérico) y metano.

3.2 Métodos analíticos

Las muestras de digestato que se tomaron en los días indicados, se centrifugaron a 9000 rpm por 20 min a 20 ºC y a partir de la fracción del sobrenadante se realizó la extracción de fitorreguladores y AGVs como se indica a continuación.

3.2.1 Cuantificación de fitorreguladores

La extracción de fitorreguladores (IAA, GA_3 y ABA) se basó en una doble modificación del pH y la utilización de acetato de etilo como disolvente [11]. Inicialmente, se aumentó el pH del sobrenadante a 9 con NaOH 10 M y se mezcló con acetato de etilo en una proporción 1:1, posteriormente se recuperó la fase acuosa, se modificó el pH a 1.5 con HCl y se mezcló nuevamente con acetato de etilo en una proporción 1:1. Se recuperó la fase orgánica, se evaporó el acetato de etilo a temperatura ambiente y el extracto se resuspendió en una mezcla de agua-metanol (1:1) con 0.2 % de ácido acético, finalmente se filtró con una membrana de nylon de 0.22 μm. La identificación y cuantificación de IAA, GA_3 y ABA se hizo por HPLC acoplado a un detector de arreglo de diodos, utilizando una columna analítica Eclipse XDB-C18 (4.6 mm ID x 250 mm 5μm) acoplada a una precolumna Zorbax Reliance Cartridge (4.6 mm ID x 12.5 mm 5μm), y como fase móvil tres líneas: agua (A), metanol (B) y agua-metanol (1:1) con 0.2 % de ácido acético (B). El volumen de inyección de la muestra fue de 20 μL y la temperatura de la columna de 25 ºC. El programa de elución consistió en un gradiente lineal a un flujo de 1 mL/min, la línea C se mantuvo a 50 % durante toda la elución, mientras que la línea A disminuyó de 50 % (0 min) a 25 % (20 min) y la línea B aumentó de 0 % (0 min) a 25 % (20 min). Posteriormente esta proporción se mantuvo constante hasta el final de la elución (27 min). Para la detección de los fitorreguladores se monitorearon las longitudes de onda a 208 nm, 215 nm y 265 nm. La cuantificación se realizó utilizando curvas de calibración de cada compuesto.

3.2.2 Determinación de AGVs

Para la extracción de AGVs se ajustó el pH del sobrenadante a 2 con H_3PO_4 y se le agregaron 0.15 g de NaCl por cada mililitro de sobrenadante, posteriormente se mezcló con diclorometano en una proporción 1:1 y se centrifugó a 7000 rpm por 15 min a 10 ºC para reconstituir las fases. Finalmente se recuperó la fase orgánica en la cual se encontraban los AGVs. La cuantificación de AGVs se llevó a cabo en un cromatógrafo de gases acoplado a un detector de ionización de flama (FID) utilizando una columna capilar HP-5 (30 m 0.32 mm 0.25 μm) y nitrógeno como gas de arrastre. La temperatura del inyector y detector fue de 250 ºC y 260 ºC respectivamente, mientras que en el horno se mantuvo a 45 ºC por 1.5 min y después aumentó hasta los 250 ºC a una tasa de 60 ºC por min, en donde se mantuvo por 5 min [12].

3.2.3 *Determinación de metano*

La determinación de metano se realizó en un cromatógrafo de gases equipado con un detector de conductividad térmica (TCD), se utilizó una columna GS-carbonplot (30 m, 0.32 mm, 3 μm) y nitrógeno como gas de arrastre. La temperatura del inyector y detector fue de 200 ºC mientras que la temperatura del horno se mantuvo en 35 ºC. El volumen de inyección fue de 500 μL y el flujo en la columna de 1.2 mL/min.

3.2.4 Medición de pH

La medición de pH se realizó utilizando un equipo medidor de pH, para lo cual se homogenizaron las muestras de digestato y se diluyeron 1:2 con agua desionizada [13].

3.3 Análisis metagenómicos

Se realizaron análisis metagenómicos de las muestras tomadas a los 0, 4, 8 y 20 días de los procesos de DA. La muestra a los 0 días fue la misma para los dos procesos evaluados (DA1 y DA2). Para recuperar la pastilla celular las muestras de digestato se centrifugaron a 9000 rpm por 20 min, posteriormente se secó la pastilla celular de cada muestra a 60 ºC hasta alcanzar un peso constante y se formó una muestra compuesta de las 3 repeticiones correspondientes a cada tiempo de muestreo. De las muestras compuestas se realizó la extracción de ADN utilizando el Power Soil DNA Isolation Kit, de acuerdo a la metodología del fabricante únicamente extendiendo el tiempo de la etapa de lisis celular. La calidad del ADN extraído se evaluó por medio de la relación espectrofotométrica 260/280 y la concentración de las muestras se ajustó a 50 ng/μL. Posteriormente se amplificó la región V4 del gen rARN 16s utilizando los oligonucleótidos 515/806 y el HotStarTaq Plus Master Mix Kit. Los amplicones se secuenciaron en la plataforma PGM Ion Torrent obteniéndose lecturas de 300 pb aproximadamente.

El análisis bioinformático de los datos de secuenciación se realizó en los software QIIME 2, Cutadapt y FastQC. Inicialmente se eliminaron las lecturas menores a 295 pb y mayores a 300 pb en Cutadapt, después se desmultiplexaron las lecturas, se eliminaron códigos de barras y primers en QIIME 2. Posteriormente se eliminaron las lecturas con una longitud menor a 250 pb y mayor a 255 pb además de cortar las primeras 20 pb de cada lectura utilizando Cutadapt. Se realizó un filtrado de calidad teniendo como parámetro una calidad mínima de 20 (en la escala de Phred) para cada pb con una tolerancia de 3 pb por debajo de este valor antes de truncar la lectura, descartando las lecturas truncadas con una longitud menor al 75 % de su longitud original. Las lecturas resultantes se ingresaron en el paquete DADA2, incluido en QIIME 2, en el cual se agruparon las secuencias con un 100 % de similitud, se eliminaron secuencias quiméricas y se filtraron nuevamente los datos teniendo como parámetro un valor de 1 para el máximo error permitido. Finalmente se realizó la asignación taxonómica utilizando un clasificador bayesiano entrenado con la base de datos SILVA 132 (silva_132_99_16S) especifico para los primers 515/806.

4. Resultados y discusión

4.1 Producción de fitorreguladores

En la Figura 1 se muestran las curvas e calibración utilizadas para cuantificar el IAA y AG_3 mediante HPLC.

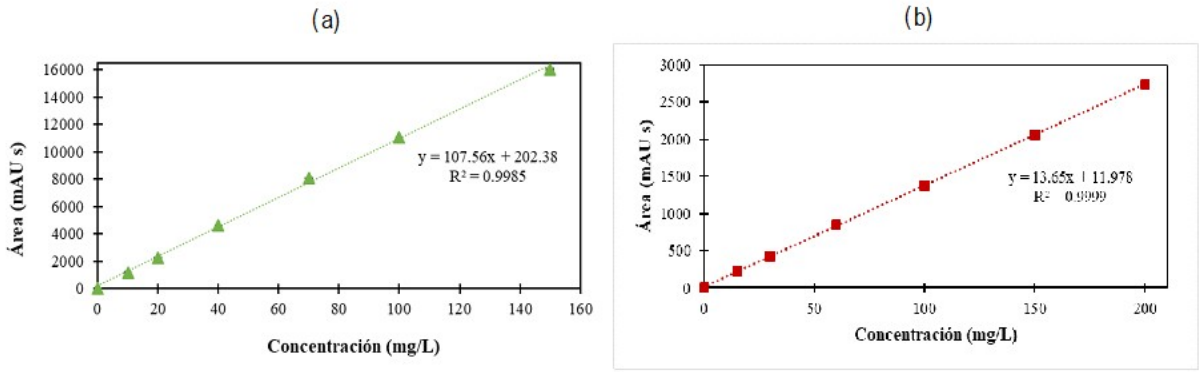


Figura 1. Curva de calibración para la cuantificación de IAA (a) y GA_3 (b) por HPLC

En la figura 2 se muestran los resultados obtenidos del seguimiento de la producción de IAA y GA_3 durante los procesos DA1 y DA2. Se puede observar que hubo diferencias en la producción de estos compuestos de un proceso a otro, demostrando el impacto de la variación del pH inicial sobre la producción de fitorreguladores.

Para el IAA se obtuvo una máxima concentración de 4.9 mg/L a los 4 días de proceso en DA1, mientras que en DA2 no se produjo IAA siendo la máxima concentración detectada en la muestra inicial (Figura 2

a). La concentración de IAA alcanzada en DA1 fue mayor a la reportada por Ertani y col. (2013) [9] de 0.006 mg/L en el digestato de la DA de estiércol de vaca y menor a la reportada por Scaglia y col. (2015) [10] con 9.94 mg/L en el digestato de la DA de estiércol de cerdo, así como a la reportada por Xin y col. (2016) [2] con 22 mg/L de IAA en el digestato de la DA de estiércol de vaca inoculado con lodos de depuradora de agua residual.

En cuanto a la producción de GA_3 en DA1 se obtuvo la máxima concentración a los 20 días de proceso con 48.6 mg/L mientras que en DA2 la máxima concentración se alcanzó a los 4 días con 38 mg/L, cabe mencionar que a pesar de que en DA1 se obtuvo la máxima concentración de GA_3 en comparación con DA2, a los 4 días de proceso la concentración de GA_3 fue mayor en DA1 que en DA2 (Figura 2b). Mientras que en DA1 hubo una acumulación de GA_3 hasta el final del proceso, en DA2 se alcanzó una concentración máxima a los 4 días y posteriormente disminuyó hasta llegar a un mínimo al final del proceso, indicando que el GA_3 dejó de producirse en DA2. Con respecto a lo anterior se reporta que el IAA, GA_3 y ABA se degradan conforme incrementa la temperatura [2]. En comparación con lo reportado en DA2 se obtuvo una mayor concentración de GA_3 que la obtenida por Xin y col. (2016) [2], en las DA de estiércol de vaca (16 mg/L), estiércol de cerdo (47mg/L) y estiércol de pollo (18 mg/L) inoculados con lodos activados de depuradora de aguas residuales. Por su parte, no se detectó la presencia de ABA tanto en DA1 como en DA2, en contraste con lo reportado por estos mismos investigadores.

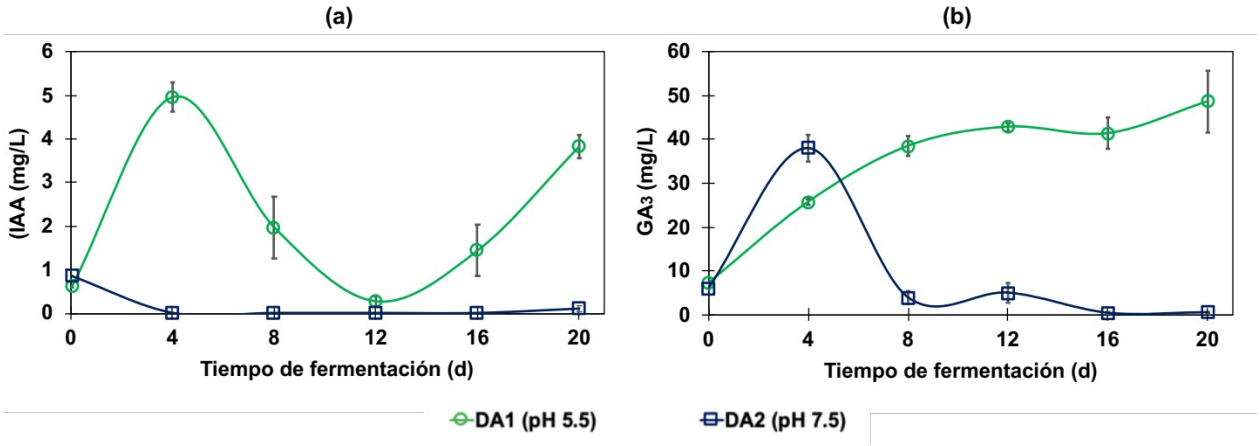


Figura 2. Producción de IAA (a); y GA_3 (b); durante las digestiones anaeróbicas de estiércol de vaca a pH inicial 5.5 (DA1) y 7.5 (DA2) a 37 ºC.

4.2 Descripción de los procesos de digestión anaeróbica

En general los procesos de DA se dividen en 4 etapas: hidrolítica, acidogénica acetogénica y metanogénica en cada una de las cuales participa un consorcio microbiano diferente [14]. Para evaluar la evolución de los procesos de DA y la etapa en la que se encuentran se dio seguimiento a los valores de pH, concentración de AGVs, volumen de biogás y contenido de metano en los procesos de DA.

En la Figura 3b se presenta el volumen de biogás acumulado en los procesos DA1 y DA2, a pesar de que en ambos casos se produjo biogás, no se detectó la presencia de metano en ninguna muestra.

Por su parte, el pH de DA1 y DA2 disminuyó desde el inicio del proceso hasta los 8 días y posteriormente se mantuvo aproximadamente constante hasta el final del proceso (Figura 3a), indicando la acidificación de las DA. Este comportamiento de los procesos de DA ha sido reportado previamente y se asocia con la utilización de sustratos altamente degradables o un desbalance en las poblaciones microbianas que participan en las diferentes etapas del proceso [15] provocando una acumulación de ácidos orgánicos, principalmente AGVs [1] como ocurrió tanto en DA1 como en DA2 (Figura 4).

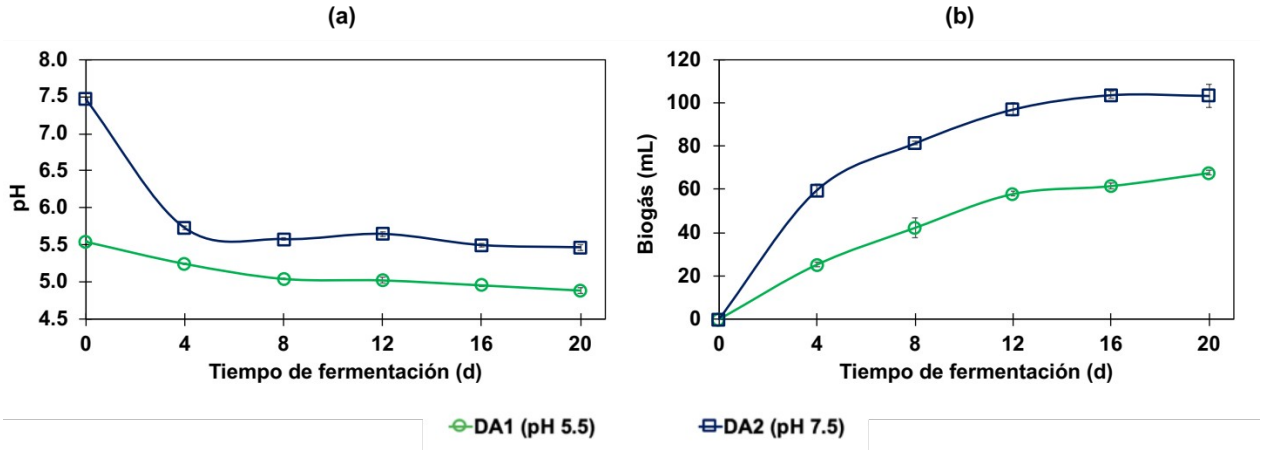


Figura 3. Seguimiento del pH (a); y la producción de biogás (b); durante las digestiones anaeróbicas de estiércol de vaca a pH inicial 5.5 (DA1) y 7.5 (DA2) a 37 ºC.

En este sentido, se reporta que la actividad de los microorganismos metanogénicos se inhibe a valores de pH menores a 6.6 [12] debido a la acumulación de AGVs de los cuales se reportan límites máximos de concentración antes de inhibir a los microorganismos metanogénicos, para el ácido acético 1600 mg/L, ácido propiónico 950 mg/L, ácido isobutírico 300 mg/L y ácido valérico 200 mg/L [12]. A pesar de que la concentración de AGVs en las DA evaluadas fue menor, el pH se mantuvo por debajo de 6.5 por lo que se observó la inhibición de la actividad metanogénica dado que no se detectó la presencia de metano en ninguna muestra.

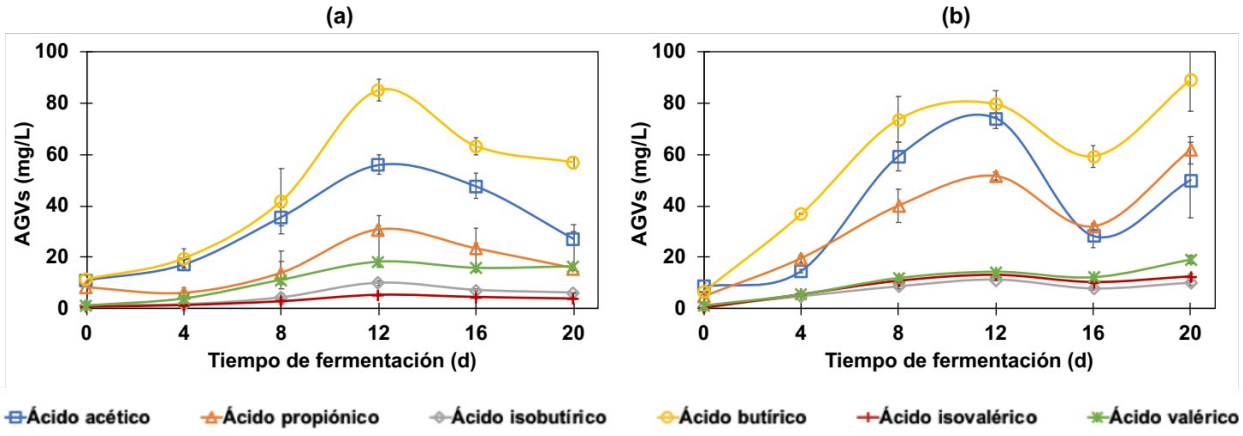


Figura 4. Seguimiento de la producción de AGVs (ácido acético, ácido propiónico, ácido isobutírico, ácido butírico, ácido isovalérico y ácido valérico) durante las digestiones anaeróbicas de estiércol de vaca a pH inicial 5.5 (DA1) (a); y 7.5 (DA2) (b); a 37 ºC.

Todo lo anterior indicó que la DA1 y DA2 se desarrollaron en la etapa acidogénica de un proceso de DA siendo en esta etapa y bajo sus condiciones en las cuales se produjeron el IAA y GA_3.

4.3 Caracterización taxonómica de las poblaciones microbianas de las digestiones anaeróbicas

Posteriormente a las etapas de limpieza y filtrado de calidad de las lecturas correspondientes a cada una de las muestras analizadas, se obtuvieron un total de 27,405 para la muestra inicial (0 d); para DA1 24,381 (4 d), 26,822 (8 d) y 28,328 (20 d); para DA2 26,156 (4 d), (8 d) 26,238 y 27,768 (20 d). Las curvas de rarefacción (datos no mostrados) mostraron el comportamiento asintótico característico de una cobertura suficiente de lecturas para cada muestra [16].

Al igual que en la producción de fitorreguladores, en las poblaciones microbianas también hubo diferencias tanto entre cada tiempo para cada una de las DA como entre ambos procesos, demostrando el efecto del pH inicial sobre los microorganismos de la DA, como se muestra en la Figura 5. En total se identificaron 14 taxones en el nivel de familia con una abundancia relativa mayor al 1 % en al menos una muestra. La mayoría de estas familias microbianas pertenecen a los filos *Firmicutes* y *Bacteroidetes* siendo los mas abundantes, además de *Actinobacteria, Tenericutes, y Spirochaetes*. Estos filos microbianos son encontrados en el rumen de los rumiantes y en los procesos de DA [17], [18], [19], [20]. Las familias bacterianas más abundantes en la muestra inicial fueron *Ruminococcaceae* y *Peptostreptococcaceae* con 22.9 % y 21 % respectivamente. Posteriormente en ambos procesos *Peptostreptococcaceae* se volvió el taxón dominante incrementando su abundancia relativa hasta alcanzar el 53.9 % y 49.5 % en DA1 y DA2 respectivamente, mientras que *Ruminococcaceae* disminuyó su abundancia a los 4 días, incrementó a los 8 días y volvió a disminuir a los 20 días en ambos procesos. Por su parte *Clostridiaceae*, al cual pertenece el género *Clostridium*, incrementó su abundancia de 1.9 % en la muestra inicial, a 7.7 % y 16.2 % en DA1 y DA2 respectivamente.

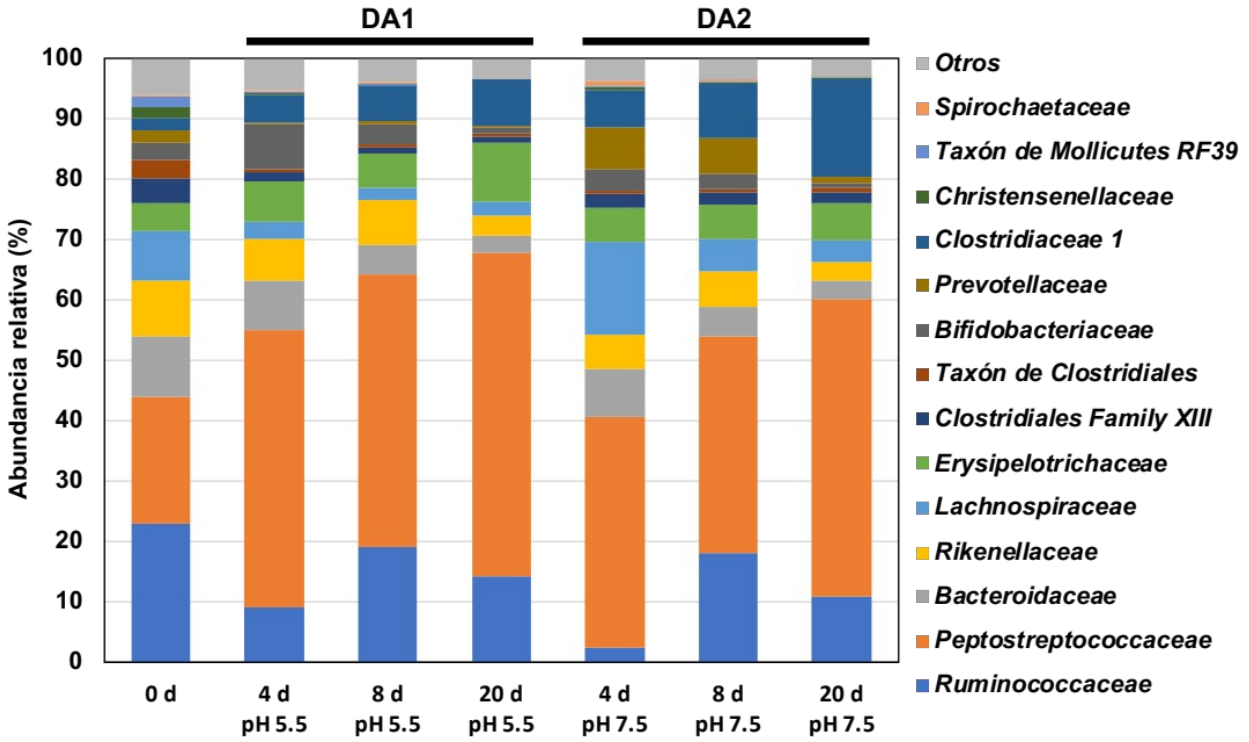


Figura 5. Abundancia relativa de microorganismos a nivel familia, a los 0, 4, 8 y 20 días de proceso de las digestiones anaeróbicas de estiércol de vaca a pH inicial 5.5 (DA1) y 7.5 (DA2) a 37 ºC. Se muestran los taxones con una abundancia relativa mayor al 1 % en al menos una muestra.

5. Conclusiones

La modificación del pH inicial influye en la composición microbiana y por lo tanto en la producción de fitorreguladores, induciendo la producción de IAA y aumentando la producción de GA_3 a pH inicial de 5.5. Por su parte, los procesos de DA evaluados se acidificaron, desarrollándose en la etapa acidogénica en la cual se produjeron los fitorreguladores. Los taxones más abundantes en ambos procesos fueron *Ruminococcaceae* y *Peptostreptococcaceae* pertenecientes al filo *Firmicutes*. A diferencia de lo reportado en la bibliografía, en los procesos de DA evaluados en este proyecto no se detectó la presencia de ABA. Finalmente, el proceso de DA podría representar una opción con potencial para la producción de fitorreguladores, debido a la utilización de sustratos residuales y el no requerir de agitación y aireación, disminuyendo el costo energético del proceso, a diferencia de los procesos aeróbicos.

6. Bibliografía

1. Brown, D., Shi, J., Li, Y. (2012). Comparison of solid-state to liquid anaerobic digestion of lignocellulosic feedstocks for biogas production. *Bioresource Technology*, 124, 379-386.
2. Xin, L., Jianbin, G., Changle, P., Renjie, D. (2016). Anaerobic Digestion and Storage Influence Availability of PlantHormones in Livestock Slurry. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 4, 719-727.
3. Bose, A., Shah, D., Keharia, H. (2013). Production of indole-3-aceticacid (IAA) by the white rot fungus Pleurotus ostreatus under submerged condition of Jatropha seedcake. Mycology. 4 (2): 103-111.
4. Gutierrez, C. K., Matsui, G. Y., Lincoln, D. E., Lovell, C. R. (2009). Production of the Phytohormone Indole-3-Acetic Acid by Estuarine Species of the Genus *Vibrio*. *Applied and Environmental Microbiology*, 75 (8), 2253-2258.
5. Li, G., Liu, S., Sun, Z., Xia, L., Chen, G., You, J. (2015). A simple and sensitive HPLC method based on pre-column fluorescence labelling for multiple classes of plant growth regulator determination in food samples. *Food Chemistry*, 170, 123–130.
6. Endo y col., (2014). ABA Biosynthetic and Catabolic Pathways. En Da-Peng, Z. (Ed.), *Abscisic Acid: Metabolism, Transport and Signaling (21-45)*. Springer.
7. Castro-Ramos, J. J., Solís-Oba, M. M., Castro-Rivera, R., Calderón-Vázquez, C. L. (2019). Minireview: uso de fitorreguladores en el manejo de cultivos agrícolas. *Frontera Biotecnológica*, 13, 14-18.
8. Tian-Qiong, S., Hui, P., Si-Yu, Z., Rong-Yu, J., Kun, S., He, H., Xiao-Ju. (2017). Microbial production of plant hormones: Opportunities and challenges. *Bioengineered*, 8 (2), 124-128.
9. Ertani, A., Pizzeghello, D., Baglieri, A., Cadili, V., Tambone, F., Gennari, M., Nardi, S. (2013). Humic-like substances from agro-industrial residues affect growth and nitrogen assimilation in maize (*Zea mays L.*) plantlets. *Journal of Geochemical Exploration* 129: 103-111.
10. Scaglia, B., Pognani, M., Adani, F. (2015). Evaluation of hormone-like activity of the dissolved organic matter fraction (DOM) of compost and digestate. *Science ot the Total Environment*, 514, 314-321.
11. Ludwig-Müller, J., Cohen, J. D. (2002). Identification and quantification of three active auxins in different tissues of *Tropaeolum majus*. *Physiologia Plantarum*, 115, 320-329.
12. Teniza-García, O., Solís-Oba, M. M., Pérez-López, M. E., González-Prieto, J. M., Valencia-Vázquez, R. (2015). Producción de metano utilizando residuos cunícolas. *Revista Mexicana de Ingeniería Química*, 14 (2), 321-334.
13. Barbazán, M., del Pino, A., Moltini, C., Hernández, J., Rodríguez, J. (2011). Caracterización de materiales orgánicos aplicados en sistemas agrícolas intensivos de Uruguay. *Agrociencia Uruguay*, 15 (1), 82-92.
14. Adekunle, K. F., Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. Advances in Bioscience and Biotechnology, 6, 205-212.
15. Pore, S. D., Shetty, D., Arora, P., Maheshwari, S., Dhakephalkar, P. K. (2016). Metagenome changes in the biogas producing community during anaerobic digestion of rice straw. *Bioresource Technology*, 213, 50–53.
16. Han, X., Yang, Y., Yan, H., Wang, X., Qu, L., Chen, Y. (2015). Rumen Bacterial Diversity of 80 to 110-Day-Old Goats Using 16S rRNA Sequencing. *PLOS ONE*, 10 (2), 1-12.
17. Alcántara-Hernández, R.J., Tas, N., Carlos-Pinedo, S., Durán-Moreno, A., Falcón, L.I. (2017). Microbial dynamics in anaerobic digestion reactors for treating organic urban residues during the start-up process. *Letters in Applied Microbiology*, 64, 438-445.
18. De Nardi, R., Marchesini, G., Li, S., Khafipour, E., Plaizier, K. J. C., Gianesella, M., Ricci, R., Andrighetto, I., Segato, S. (2016). Metagenomic analysis of rumen microbial population in dairy heifers fed a high grain diet supplemented with dicarboxylic acids or polyphenols. *BMC Veterinary Research*, 12 (29), 1-9.
19. Fernando, S. C., Purvis, H. T., Najar, F. Z., Sukharnikov, L. O., Krehbiel, C. R., Nagaraja, T. G., Roe, B. A., DeSilva, U. (2010). Rumen Microbial Population Dynamics during Adaptation to a High-Grain Diet. *Applied and Environmental Microbiology*, 76 (22), 7482-7490.

20. Iqbal, M. W., Zhang, Q., Yang, Y., Zou, C., Li, L., Liang, X., Wei, S., Lin, B. (2018). Ruminal fermentation and microbial community differently influenced by four typical subtropical forages in vitro. Animal Nutrition, (4), 100-108.

Efecto fertilizante de digestatos en cultivo de pasto Ballico perenne

Castro-Ramos, J. J. [1], Solís-Oba M.M.[1], Castro-Rivera R., Osorio-Cortes G. [2], Romero-Rodríguez A. [1], Juárez-Rangel A. [1], Pacheco-Ortiz J.A. [1]

[1] Instituto Politécnico Nacional, Centro de Investigación en Biotecnología Aplicada, Tepetitla de Lardizábal, Tlaxcala, México, CP 90700.

[2]Instituto Tecnológico Superior de Tlaxco, Tlaxcala, México

jonathan_castro@live.com.mx, myrobatlx@yahoo.com.mx, LupitaOsorio.9712@hotmail.com, angei_raztaromer@hotmail.com, ing.biotec.rangel@outlook.es, agustin.pacheco0192@gmail.com

1. Resumen

La digestión anaeróbica es un proceso mediante el cual se aprovechan los residuos para obtener biogás, que es una fuente alterna de energía y digestato, éste es un subproducto al que se le han atribuido propiedades fertilizantes por su contenido de materia orgánica y fitoreguladores. En este trabajo se hizo la digestión de estiércol de vaca al 7% de sólidos totales, con pH inicial de 5.5 y 7.5, a 37°C. Se cuantificó la presencia de ácido índole acético (AIA) y ácido giberélico (AG), posteriormente los digestato obtenidos a 4, 8 y 20 días de digestión se utilizaron para fertilizar pasto Ballico perenne. Hubo un efecto diferenciado en la producción de fitoreguladores, a pH 5.5 fueron en mayor cantidad, mientras que a pH 7.5 no se produjo ácido indol acético. Al aplicar todos los digestato se obtuvo un incremento tanto en la altura como en la biomasa comparado con el control negativo donde no se fertilizó. Se recomienda llevar a cabo la digestión a pH 5.5 y dejarla durante 20 días, ya que de esa forma se obtiene mayor cantidad de AIA y AG y mejores propiedades fertilizantes.

2. Introducción

La digestión anaeróbica es un proceso bioquímico en el cual diversos microorganismos anaerobios degradan la materia orgánica en ausencia de oxígeno, y cuyo principal producto es el biogás [1]. Tradicionalmente la digestión anaeróbica ha sido utilizada para el tratamiento de residuos sólidos y aguas residuales, debido a las ventajas que ofrece frente al tratamiento aeróbico;, sin

embargo, debido a la necesidad por la generación de energía a partir de fuentes renovables, ha recobrado gran interés por parte de la comunidad científica por la producción del biogás [2]. Adicionalmente la digestión anaeróbica está siendo ampliamente estudiada dado que el digestato, que es el subproducto de la digestión anaeróbica, se ha utilizado como fertilizante orgánico.

En la actualidad ha incrementado el uso de fertilizantes orgánicos debido a que la fertilización química ha ocasionado graves problemas ambientales, como es la erosión y la contaminación de suelo, aire y agua. Entre los fertilizantes orgánicos que mas se han empelado destacan los siguientes:

El digestato. Como ya se mencionó, este es el subproducto de la digestión anaeróbica, se obtiene usando como sustratos diversos residuos, tanto de origen animal como vegetal [3]; este subproducto ha sido descrito ampliamente por sus propiedades como fertilizante en agricultura, atribuyendo su efecto principalmente a la elevada concentración de macronutrientes (nitrógeno, fósforo y potasio), mientras que algunas investigaciones revelan que además poseen fitorreguladores, mismos que son producidos durante el proceso de digestión anaeróbica [4]. Otro producto utilizado en el mismo sentido es la composta, esta se obtiene por la descomposición aeróbica de diversos residuos, usualmente el proceso se lleva a cabo en pilas, manteniendo la humedad y aireación para acelerar el proceso de descomposición [5]. Este proceso de descomposición aeróbica también se ha llevado a cabo con la ayuda de la lombriz roja californiana *Eisenia faetida*, en este caso las lombrices además de acelerar el proceso de descomposición, llevan a cabo la aireación de manera natural. Estos abonos se han utilizado de manera satisfactoria para incrementar el desarrollo de las plantas y por ende la producción agrícola [6].

Los fitorreguladores son compuestos que regulan los procesos fisiológicos de las plantas a lo largo de su desarrollo. Estas moléculas actúan donde son sintetizadas o se transportan a otros sitios de la planta, provocando respuestas bioquímicas, fisiologías o morfológicas [7]. Los principales grupos de fitorreguladores son las auxinas, giberelinas, citoquininas e inhibidores, de donde el ácido giberélico (GA3), ácido indolacético (IAA) y ácido abscísico (ABA) son los principales representantes de las giberelinas, auxinas e inhibidores respectivamente [8]. Entre los fitorreguladores producidos durante la digestión anaeróbica encontrados en la fracción liquida del digestato están el GA3, IAA y ABA [4].

Los fitorreguladores presentan diversas aplicaciones en la agricultura siendo a menudo utilizados como una herramienta de manejo en cultivos tecnificados. Su utilización permite promover o reprimir eventos fisiológicos específicos en las plantas a fin de lograr el efecto deseado. Las giberelinas se utilizan para promover el inicio de la floración, desarrollo de frutos, aumentar los rendimientos en el cultivo de caña, en la regeneración de cultivos de plantas in vitro, así como en la germinación y malteado de la cebada, mientras que las citoquininas se aplican para la propagación y regeneración de tejidos de plantas y en el control de la senescencia. Por su parte, las auxinas sintéticas se usan para frenar el brote de yemas de tubérculos de papa, para destruir hierbvas de hoja ancha, para obtener frutos sin semillas, así como para prevenir la caída prematura de frutos y pétalos de flores [9].

Por otro lado, el Ballico perenne Ballico perenne (*Lolium perenn*e L.) es de las gramíneas más utilizados para la producción pecuaria en las zonas templadas de México, debido a sus altos rendimientos, calidad nutritiva y facilidad para crecer en diferentes tipos de suelo [10]; se cultiva extensamente en gran parte del mundo como forraje o pasto, cuando se siembra a altas densidades (mayor a 75 kg semillas/ha), el Ballico perenne puede reducir el crecimiento de la vegetación circundante. Las raíces de Ballico perenne atan el suelo, disminuyendo así la erosión, sin embargo, ésta especie disminuye la humedad del suelo y la disponibilidad de nutrientes. Es una especie altamente productiva, que puede llegar a 18-20 t ha^{-1} $año^{-1}$ de MS bajo condiciones de manejo y ambientes ideales. En condiciones de trópico y sub-trópico se puede obtener producciones de biomasa superiores a 25 t MS ha^{-1} $año^{-1}$ [11].

3. Condiciones experimentales

3.1 Materiales

El estiércol de vaca fue donado por el Instituto Tecnológico del Altiplano de Tlaxcala.

3.2 Digestiones anaeróbicas.

Las digestiones se llevaron a cabo en botellas serológicas de 135 ml, ajustando a 7% de sólidos y pH inicial de 5.5 y 7.5, se mantuvieron en incubación a 37 °C. A los 4, 8, 12, 16 y 20 días se tomaron 3 botellas de cada tratamiento y se midió el pH, ácido índole-3 acético (AIA) y ácido giberélico (AG3) como se indica:

3.3 Cuantificación de fitorreguladores

A las muestras de digestato se les centrifugó a 3000 rpm durante 5 min, el sobrenadante se ajustó a pH 9 con NaOH 10 N y se extrajo con acetato de etilo en una proporción 1:1, se descartó la fase orgánica. La fase acuosa se ajustó a pH a 1.5 con HCl y se extrajo nuevamente con acetato de etilo en una proporción 1:1. La fase orgánica se dejó evaporar a temperatura ambiente y el extracto se resuspendió en una mezcla de agua-metanol (1:1) con 0.2 % de ácido acético, finalmente se filtró con una membrana de nylon de 0.22 micras. La identificación y cuantificación de IAA y GA3 se hizo por HPLC acoplado a un detector de arreglo de diodos, utilizando una columna analítica Eclipse XDB-C18, como fase móvil agua-metanol (1:1) con 0.2 % de ácido acético a un gradiente lineal de 1 mL/min. Para la detección de los fitorreguladores se

monitorearon las longitudes de onda a 208 nm, 215 nm y 265 nm. La cuantificación se realizó utilizando curvas de calibración de cada compuesto.

3.4 Fertilización de Ballico perenne

Se probaron los digestatos obtenidos después de 4, 8 y 20 días de digestión y se utilizaron para fertilizar un cultivo de pasto ballico perenne. Primeramente, se estableció el cultivo colocando semillas de pasto Ballico en macetas conteniendo un kilogramo de suelo agrícola, se cuidó el riego y desyerbado periódico, a los 6 meses de que se hizo el sembrado, se hizo corte de uniformización a 5 cm. Cada maceta se fertilizó adicionando en la base del macollo 35 ml del digestato fermentado a 4, 8 y 20 días (tiempos elegidos de acuerdo con la producción de fitoreguladores) a los dos valores de pH inicial; el control negativo fue sin ninguna fertilización.

El registro de altura del forraje se hizo semanalmente durante 5 semanas, considerando el valor de la regla graduada de 30 cm, colocada desde la base del tallo, hasta el tejido vegetal del dosel superior.

El rendimiento de forraje, fue obtenido a una frecuencia de corte de cinco semanas de crecimiento, el material vegetal cosechado fue deshidratado en una estufa de aire forzado a 65 °C, hasta un peso constante y se registró el valor de materia seca.

Se utilizó un diseño completamente al azar, y los resultados obtenidos en las variables se analizaron con el procedimiento PROC GLM del Software estadístico SAS® Versión 9.0 para Windows®. Las medias de tratamientos fueron estimadas utilizando Tukey a un nivel de significancia del 5%.

4. Resultados y discusión

4.1 Producción de ácido giberélico

La figura 1 muestra las cantidades medidas de ácido giberélico. La modificación del pH inicial cambió la producción de AG3, esta fue mayor en la digestión llevada a pH 5.5; en esta se detectó este ácido desde el inicio y hasta el día 20; la máxima producción de AG3 fue de 45.3 mg/L. En la digestión que se llevó a cabo a pH inicial de 7.5 tuvo un máximo a los cuatro días de digestión y posteriormente disminuyó, teniendo un segundo máximo a los 12 días de digestión. En esta digestión la cantidad máxima de

AG3 que se obtuvo fue de 37.7 mg/L. Hubo una diferencia en la digestión llevada a cabo a pH ácido respecto a la llevada a cabo a pH básico

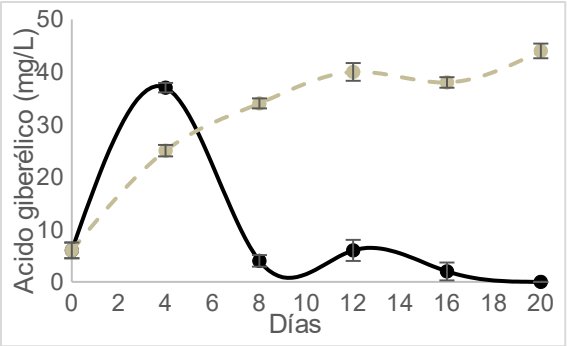


Figura 1. Cinética de producción del ácido Giberélico

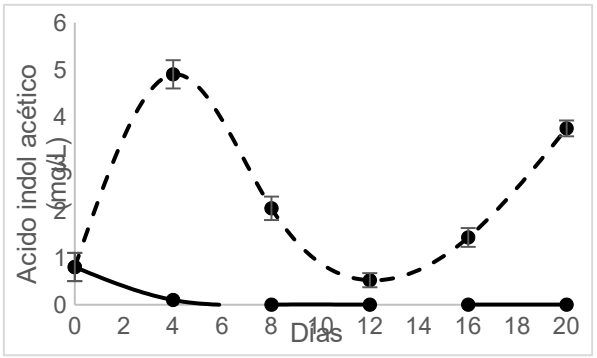


Figura 2. Cinética de producción de ácido índol acético

4.2 Producción de ácido indol acético

La figura 2 muestra las cantidades medidas de ácido indol acético. En este caso, la modificación del pH inicial influyó drásticamente en la producción de AIA, esta únicamente se llevó a cabo en la digestión a pH inicial de 5.5; en esta hubo un máximo a los 4 días y posterior al día 12 volvió a incrementar; la máxima producción fue de 4.8 mg/L. En la digestión que se llevó a cabo a pH inicial de 7.5 no hubo producción de AIA.

4.3 Rendimiento en Ballico perenne

La figura 3 muestra las alturas medidas semanalmente a los pastos fertilizados con el digestato obtenido a los 4, 8 y 20 días de digestión, así como en el control, donde no se aplicó ningún fertilizante. Se observa que, desde la primera semana, los pastos tuvieron mayor altura que los correspondientes al control. Es importante destacar que según el análisis estadístico, no se observa diferencia significativa en las alturas aplicando digestato después de 4, 8 o 20 días de digestión, ya que el efecto en la altura es el mismo. Asimismo, no se observa diferencia significativa al aplicar digestato obtenido a pH inicial 5.5 o 7.5. Cualquiera de los digestatos puede usarse como fertilizante, lo cual indica que, si bien los fitoreguladores son importantes para mejorar el desarrollo de las plantas, hay otros componentes, como son los nutrientes y material orgánica del digestato que están favoreciendo al pasto. Xin *et al.* [4] indican que el efecto positivo del digestato en las plantas se ha explicado por su contenido de macronutrientes: nitrógeno del 0.03 al 0.08 %, fósforo de 0.02 al 0.07 % y potasio del 0.05 al 1.4 %.

La tabla 1 muestra la biomasa obtenida después de cinco semanas de haberse fertilizado con los digestatos, así como el control negativo, donde no se fertilizó. Se observa que al utilizar el digestato obtenido a pH 5.5 y 4 días de fermentación, la biomasa obtenida es estadísticamente igual al control sin fertilizar; pero en los demás tratamientos se obtuvo estadísticamente mayor biomasa que en el control. El tratamiento donde se obtuvo estadísticamente la mayor cantidad de biomasa fue aplicando digestato obtenido a pH inicial 5.5 y después de 20 días de fermentación; en este caso el incremento fue del 27% respecto al control negativo; el siguiente mayor valor fue usando digestato a pH inicial 5.5 y después de 8 días de digestión, así como los obtenidos a pH inicial 7.5 y a los 4 y 20 días de digestión, en estos casos el incremento fue del 19% respecto al control.

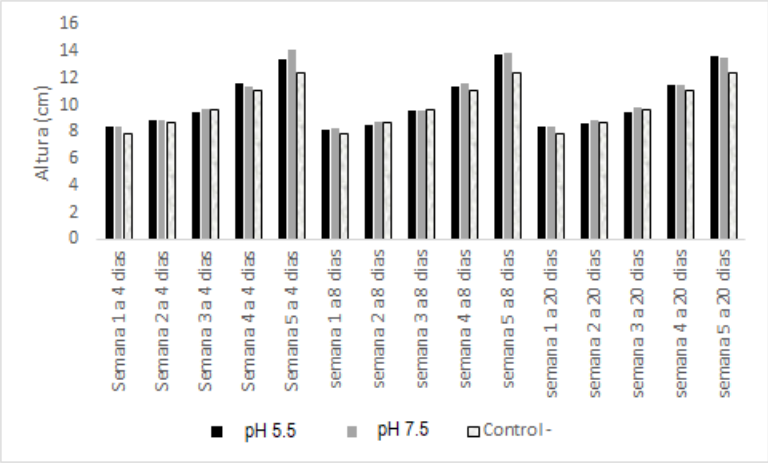


Figura 3. Altura semanal de las plantas fertilizadas con digestato obtenido después de 4, 8 y 20 días de digestión y en el control negativo

Si bien se obtuvo mayor cantidad de fitoreguladores en la digestión a pH inicial 5.5, no se observó mayor altura comparada con la digestión a pH inicial 7.5, pero si hubo un incremento en la biomasa al fertilizar con digestato obtenido con pH inicial 5.5.

Tabla 1. Biomasa obtenida en las plantas fertilizadas con digestato obtenido después de 4, 8 y 20 días de digestión y en el control negativo

Tratamiento	Biomasa (g)		
	4 días de digestión	8 días de digestión	20 días de digestión

pH 5.5	49.5 c	58.8 ab	62.4 a
pH 7.5	58.4 ab	51.2 b	58.2 ab
Control -	49.1 c		

Los resultados obtenidos concuerdan con lo reportado por otros autores, por ejemplo, Eickenscheidt *et al.* [12] encontraron que la aplicación de digestato a una parcela con pasto incrementó su rendimiento y la eficiencia aparente del uso de N total comparado con la aplicación de estiércol líquido. Tempere y Viiralt [13] encontraron que al aplicar digestato hubo mayor rendimiento en praderas que donde no se fertilizó o usando fertilizante químico. Eich-Greatorex et al. [14] reportaron que la adición de digestato dio un efecto positivo en la producción de biomasa de dos tipos de pasto, posiblemente por la rápida mineralización, por lo que hubo mayor cantidad de N disponible y por la cantidad de P proporcionada por el digestato.

5. Conclusiones

Los digestato obtenidos independientemente del pH inicial del proceso de digestión (5.5 o 7.5), tuvieron un efecto fertilizante en el pasto Ballico perenne, incrementando tanto la altura como la biomasa. Se recomienda que la digestión se deje durante 20 días, ya que de esta forma la biomasa incrementó hasta un 27% comparado con el control negativo, esto en términos económicos puede ser un ahorro para la obtención de forrajes.

6. Bibliografía

1. Adekunle, K. F., Okolie, J. A. (2015). A Review of Biochemical Process of Anaerobic Digestion. Advances in Bioscience and Biotechnology, 6, 205-212.
2. Mao, C., Feng, Y., Wang, X., Ren, G. Review on research achievements of biogas from anaerobic digestion. Renewa. Sustain. Ener. Rev. V. 45, 540–555 (2015).

3. Kalyuzhnyl S.V., Fedorovieh V.V., Lens P. Dispersed plug flow model for upflow anaerobic sludge bed reactors woth focus on granular sludge dynamics. J Ind. Microbio. Biotehcnol. V. 33, 221-237 (2006).
4. Xin, L., Jianbin, G., Changle, P., Renjie, D. Anaerobic Digestion and Storage Influence Availability of PlantHormones in Livestock Slurry. ACS Sustain. Chem. Eng. V. 4, 719−727 (2016).
5. Bustamante M.A., Albuquerque J.A., Restrepo A.P., De la Fuente C., Paredes C., Moral R., Co-composting of solid fraction of anaerobic digestate, to obtain added – value materials for use in agricultura. Biomass. Bioener. V. 23, 26-35 (2012).
6. Gutiérrez-Miceli F.A., Santiago-Boraz J., Montes-Molina J.A., Carlos-Nafate C., Abud-Archila M., Oliva-Llaven M.A., Rincon.Rosales R., Dendooven L. Veermicompost as a soil supplement to enhance the growth, yield and quality of tomato fruit (Licopersicum esculentum). Biores. Tecnjol. V. 98, 2781-2786 (2007).
7. Baca, B. E., Elmerich, C. En: E., Elmerich, Newton, W. E. (eds.), Microbial production of plant hormones, Associative and Endophytic Nitrogen-fixing Bacteria and Cyanobacterial Associations. Netherlands: Kluwer Academic Publishers, (2003).
8. Hou, S., Zhu, J., Ding, M., Lv, G. Simultaneous determination of gibberellic acid, indole-3-acetic acid and abscisic acid in wheat extracts by solid-phase extraction and liquid chromatography–electrospray tandem mass spectrometry. Talanta, V. 76, 798-802 (2008).
9. Jordán, M., Casaretto, J. Hormonas y Reguladores del Crecimiento: Auxinas, Giberelinas y Citocininas. En: Squeo, F. A., Cardemil, L. (eds.), Fisiología vegetal. La Serena, Chile: Ediciones Universidad de La Serena. (2006).
10. Velasco-Zabuadúa, M.A., Hernández-Garay, A., González-Hernández, V.A., Pérez-Pérez, J., Vaquera-Huerta, H. (2002). Curvas estacionales de crecimiento de ballico perenne. Rev. Fitotec. Mex. 25 (1): 97-106.
11. Villalobos, L., Sánchez J., Evaluación agronómica y nutricional del pasto raigrás perenne tetraploide (Lolium perenne) producido en lecherías de las zonas altas de Costa Rica. I. Producción de biomasa y fenología. Agron. Costarr. V. 34, 31-42 (2010).
12. Eickenscheidt, T., Freibauer, A., Heinichen, J., Augustin, J., Drösler M. Short-term effects of biogas digestate and cattle slurry application on greenhouse gas emissions affected by N availability from grasslands on drained fen peatlands and associated organic soils. Biogeosc. V.11, 6187-6207 (2014).
13. Tempere, M., Viiralt, R. The effficiency of biogás digestate on grassland and compared to mineral fertilizer ans cattle slurry. Res. Rural Develop. V. 1, 89-94 (2014).
14. Eich-Greatorex, S., Vivekanand, V., Estevez, M.A., Schnürer, A., Børresen T. & Sogn, T.A. Biogas digestates based on lignin-rich feedstock – potential as fertilizer and soil amendment. Arch. Agron. Soil Sci. V. 64, 347-359 (2018).

Obtención de glucosa proveniente de la Papa *Oxalis Tuberosa* empleando dos enzimas comerciales y tres sustratos enzimáticos

Sánchez, B. I.,[1] Del Ángel, Z. J. A., [1] Juárez, R. V.,[2] Juárez, R.O.,[3] Juárez, S. A.[3] García, H. T.,[1] Barriga, O. N.,[1].

[1]Universidad Veracruzana, Facultad de Ciencias Químicas, Orizaba, Veracruz, México.

[2]Universidad Veracruzana, Facultad de Ingeniería, Ixtaczoquitlán, Veracruz, México.

[3]Universidad Veracruzana, Facultad de Negocios y Tecnologias, Ixtaczoquitlán, Veracruz, México.

igsanchez@uv.mx, jodelangel@uv.mx, vijuarez@uv.mx, ojuarez@uv.mx, arjuarez@uv.mx, tangarcia@uv.mx, noviedo@uv.mx.

1. Resumen

Entre los principales usos del almidón en la industria alimentaria destacan la elaboración de jarabes con alto contenido en glucosa y fructuosa, así como la obtención de glucosa y fructosa cristalina. En el presente trabajo se extrae almidón a partir de Papa *Oxalis Tuberosa* realizándose la caracterización fisicoquímica y funcional, obteniéndose: una temperatura de gelatinización de 57.9 °C. u humedad de 10.256 se sabe que un almidón con humedad menor al 10% resulta evita el deterioro de los almidones durante su almacenamiento. Se emplean un total de cinco enzimas, de las cuales dos de ellas son comerciales y las tres restantes son extraídos de proyectos que se realizan en la Facultad de Ciencias Químicas de Orizaba, Veracruz, México. Sé parte de una hidrólisis enzimática de almidón utilizando dos concentraciones al 1% y al 5%, se seleccionó a la Xilanasa como la enzima con mayor aprovechamiento, para posteriormente adicionarle vitamina C obtenida de cascara de naranja.

2. Introducción

El termino azúcar o “azucares” suele emplearse para designar los diferentes monosacáridos y/o disacáridos que se caracterizan por tener un sabor dulce. El 70% del azúcar del mundo se produce a partir de la caña de azúcar y el resto de la remolacha. En la actualidad, la alta ingesta de azúcar entre la población mexicana ha ocasionado problemas de salud. México es el país que ocupa el 6° lugar de consumo de azúcar a nivel mundial, según cifras oficiales México es de los países con mayor obesidad en el mundo.

El exceso en el consumo de productos azucarados es considerado como un factor de riesgo y puede llevar a la obesidad, ya que sustituye el consumo de alimentos nutritivos. Si el cuerpo no recibe todos los nutrimentos que necesita para formar energía y otras funciones en cada comida, se acumula como grasa, causando obesidad y otras enfermedades crónicas como la alta presión, alto colesterol, piedras en la vesícula, diabetes, entre otros. Los endulzantes naturales son la mejor opción para satisfacer la necesidad de algo dulce.

Uno de los mayores problemas que se tienen es que el gusto del azúcar refinado es agradable y las personas no están dispuestas a sustituirla, sin embargo esto cambia completamente los sabores de los alimentos o bebidas que la contienen, es por eso que una alternativa factible es la implementación de edulcorantes obtenidos a partir de otras fuentes no convencionales.

El objetivo es extraer jarabe glucosado a partir del almidón de la papa *Oxalis Tuberosa* así como adicionar vitamina C la cual es un tipo de vitamina que no se produce en el organismo humano y que se debe ingerir de manera muy frecuente debido a que es hidrosoluble, de igual manera posee propiedades y beneficios al organismo. Además, se realizaran pruebas a nivel laboratorio para determinar la factibilidad del producto y observar el comportamiento del jarabe al adicionar la vitamina C y como se sabe dicha vitamina es muy inestable debido a que es muy termosensible y fotosensible a la vez.

3. Condiciones experimentales

El proceso de obtención de jarabe glucosado se realizó en dos etapas, inicialmente consistió en seleccionar la fuente de obtención del almidón, en este caso se optó por la papa *Oxalis Tuberosa* para posteriormente aislar el almidón contenido en el tubérculo. El almidón obtenido y seco se le realizó pruebas fisicoquímicas. La Figura 1 muestra la metodología que se empleó para realizar dicho proceso.

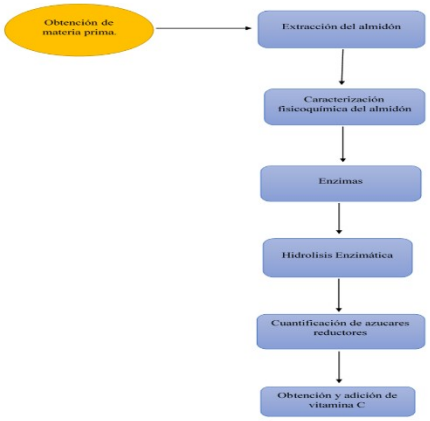


Figura 1. Metodología de la obtención de almidón enriquecido con vitamina C

3.1 Adecuaciones preliminares

Los métodos utilizados han sido empleados para tener un perfil de la composición del almidón y el control de variables durante la hidrólisis enzimática en utilización de las 5 enzimas ya mencionadas.

3.1.1. Extracción del almidón a partir de la Papa Oxalis Tuberosa

El procedimiento se realizó a nivel laboratorio, se obtuvieron 105.1 gr de almidón de un total de 7000 gr de papa *Oxalis Tuberosa*. Se identificó que se obtiene un promedio de 15.014 g de almidón por cada 1000 g de materia prima, esto demuestra que la papa *Oxalis Tuberosa* es una fuente potencial para la obtención de almidón en comparación con la jícama[1]. Al realizar la prueba de identificación de almidón se observó que cuando se le añadieron gotas de yodo u logro un cambio de color a azul oscuro.

3.2. Enzimas

Se emplearon en total cinco enzimas, de las cuales 2 son de uso comercial las cuales son Celluclast 1.5 L. y Lyvanol Devisco 1500 Xylanase, en el caso de las formulaciones 2, 3 y 4 se obtuvieron a través de cultivos de microorganismo realizados en el laboratorio 111 de la Facultad de Ciencias Químicas[2], por los microorganismos utilizados para la realización de las distintas formulaciones se muestran en la *Tabla 1*. Debido a estudios previos realizados se optó por utilizar dichos microorganismos ya que son los que obtuvieron mejor rendimiento[3].

Tabla 1. Microorganismos utilizados y su procedencia

Procedencia	**Microorganismos**
ATCC-MYA-4641	Aspergillus carbonarius
ATCC-56765	Trichoderma reesei
CIB-UAEM	Trametes versicolor (cepa 12)
CIB-UAEM	Pycnoporus sanguineus (cepa 1/5-1)

3.2.1. Preparación de extracto enzimático

La producción de extractos enzimáticos fúngicos se realizó cultivando cada hongo de manera individual en el medio de cultivo como se describió previamente. En el caso de los microorganismos

que producen dos enzimas de interés diferentes, se cultivaron por separado para obtener la misma cantidad de sobrenadante al término de su cultivo. Se tomaron muestras a partir del momento de inoculación cada 24 horas manteniéndose en hielo para posteriormente ser centrifugadas a 10 000 rpm durante 10 minutos, se recuperó el sobrenadante y se almacenó en tubos de microcentrífuga de 1.5 mil de la marca Eppendorf™ estériles a -20°C para su posterior análisis. Todos los muestreos y manipulaciones se realizaron en condiciones de esterilidad total.

3.2.2 Preparación de las formulaciones de extractos crudos de amplio espectro enzimático lignocelulósico.

Las formulaciones se prepararon a partir de los extractos crudos obtenidos previamente del cultivo en medio líquido. Se tomó un tubo con sobrenadante previamente alícuotado y congelado, de cada uno de los microorganismos en sus diferentes tiempos de cultivo, los cuales se centrifugaron a 10 000 rpm durante un tiempo de 10 min. Posteriormente se prepararon cada una de las formulaciones, en tubos para centrífuga cónicos de 50 mil (Falcon™) estériles, los cuales se mantuvieron en un baño agua-hielo con un volumen total de 15 mil. Se homogenizaron los sobrenadantes con ayuda de un vórtex, y se almacenaron en congelación a -20°C hasta su posterior análisis como se muestra en la *Tabla 2*.

Tabla 2. Composición de las formulaciones 2, 3, 4.

Formulación	Volumen % V/V	Microorganismo	Actividades enzimáticas producidas	Actividad enzimática teórica en la formulación IU/mL	Actividad enzimática real en la formulación IU/mL
2	25%	A. carbonarus P. sanguineus 1/5 T. reesei 10 días T. versicolor 10 días	β -Glucosidasa	32	32.2
			Lacasa	10679	504
			Endoglucanasa	0.5	0.6
3	25%	A. carbonarus P. sanguineus 1/5 T. reesei 10 días T. reesei 6 días	β -Glucosidasa	34	30.4
			Lacasa	8544	464
			Endoglucanasa	0.3	0.7
			Xilanasa	0.1	0.3
			FPU	0.1	0.2
4	40% 20%	A. carbonarus P. sanguineus 1/5 T. reesei 10 días T. reesei 6 días	β –Glucosidasa	53	34
			Lacasa	6835	443
			Endoglucanasa	0.3	0.6
			Xilanasa	0.1	0.3
			FPU	0.1	0.1

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En la *Figura 2*. Se puede observar la composición del almidón de papa *Oxalis Tuberosa* y los grupos funcionales que se encuentran presentes, por ejemplo el enlace simple entre O-H que se encuentra en el primer pico que corresponde a 3289.01, el enlace C-H se encuentra en el segundo pico con un valor de 2926.57, de igual manera se observa el enlace C-O que se encuentra en la parte final del espectro con el pico más largo teniendo un valor de 995.41, por último el enlace C-C con un valor de 927.53. En base a ello se comprueba que la muestra analizada en efecto es almidón ya que contiene los mismos grupos funcionales que posee teóricamente la estructura de este.

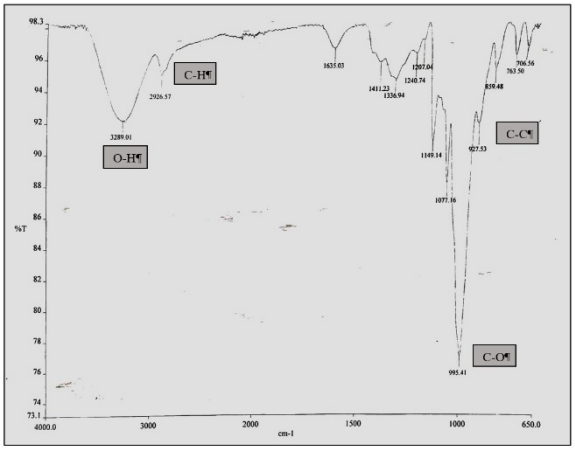


Figura 2. IR de almidón de papa Oxalis Tuberosa

4.1. Caracterización fisicoquímica del almidón

En la *Tabla 3* se muestran los resultados de las pruebas fisicoquímicas realizadas al almidón de papa extranjera en comparación con las propiedades de la fuente principal de almidón en la producción de jarabe de alta fructosa. Los resultados muestran que la temperatura de gelatinización de papa *Oxali Tuberosa* es más baja que la temperatura de gelatinización del maíz, de igual manera el porcentaje de humedad es un factor que depende tanto de la materia prima como del método de obtención y las condiciones del proceso de deshidratación. Un contenido de humedad menor al 10% resulta conveniente para evitar el deterioro de los almidones durante su almacenamiento.

Tabla 3. Características fisicoquímicas del almidón de papa Oxalis Tuberosa

Muestra Almidón	% Da g/mL	Temperatura de gelatinización °C	% Cenizas	% humedad	Características físicas de almidón	Fuente
Papa *(Oxallis tuberosa)*	1,026.47	58.2	0.49	9.6	Viscosidad media, blanco y altos niveles de gelificación.	Experimental
Maíz	-	88-90	0.5	6.8-8.3	Tiene una viscosidad media, es opaco y posee tendencia alta a gelificar	(Tovar, 2008)
Jícama	920.9	67.4	0.46	10.2	Viscosidad media, blanco, alto nivel de gelificación.	(Cruz, 2019)

4.2. Obtención y cuantificación de azucares reductores

Los resultados de g/L de glucosa obtenidos a una concentración del 1%, indicó que la enzima con un mayor rendimiento y aprovechamiento es la Xilanasa, ya que esta logra hidrolizar de una mejor manera el almidón y alcanzó un valor total de 67.82 g/L de glucosa, el mejor rendimiento de dicha enzima se alcanzó en el lapso de las horas 3 y 4 ya que incrementó de manera significativa en un 48%.

En la *Figura 3* se observa a través de las líneas de tendencia el rendimiento de las enzimas con respecto al tiempo de incubación en la hidrólisis enzimática. Destaca que en la gráfica no aparece el rendimiento de la enzima xilanasa, ya que como se mencionó anteriormente fue la enzima con mejor rendimiento alcanzado, por lo que se representó en una gráfica por separado debido a la diferencia del rendimiento en comparación con las otras enzimas. La formulación 3 tiene mejor rendimiento con respecto a las demás enzimas, ya que con la ayuda de las líneas de tendencia se observó como la liberación de glucosa incrementa en mayor cantidad, también se aprecia como la celulasa y la prueba abiótica tienen el rendimiento más bajo debido a que la tendencia se mantienen prácticamente en 0, liberando una muy mínima cantidad de glucosa.

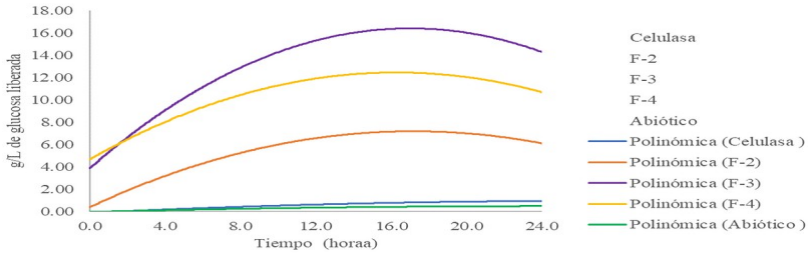


Figura 3. g/L de glucosa liberada a una concentración de 1% de almidón.

En la Figura 4 se observa el comportamiento de la enzima Xilanasa, cabe destacar que su rendimiento es muy bueno alcanzando un valor por encima del promedio, por dicha razón se graficó aparte ya que su alto valor obtenido no permitía que se apreciaran el comportamiento de las demás enzimas. Evidentemente se aprecia cómo la concentración de glucosa aumenta con el paso del tiempo, donde con anterioridad se describió que dicha enzima alcanzó una mayor reacción a las cuatro horas de haber incubado las muestras de almidón con la enzima. De esta manera se comprueba que la Xilanasa a una concentración de 1% de almidón obtiene un gran rendimiento.

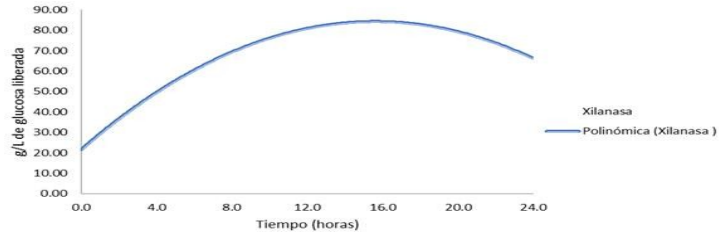


Figura 4. Rendimiento de la Xilanasa a una concentración de 1% de almidón

Para la concentración del 5% de almidón, se observó que los resultados son similares ya que nuevamente la enzima xilanasa es la que obtiene un mejor rendimiento alcanzando un valor de 31.15 g/L de glucosa, lo que lo convierte en la enzima con mejor aprovechamiento, pero a diferencia de la xilanasa al 1% esta obtiene un reacción mucho más tardía ya que se observó el incremento más significativo de liberación de glucosa en el lapso de tiempo de 8 a 24 horas. En la *Figura 5* se observa mejor el comportamiento de las enzimas al hidrolizar el almidón de papa *Oxalis tuberosa*. La Xilanasa ya que logró tener los valores más altos representados mediante la línea de tendencia, las formulaciones 2, 3 y 4 se encuentran en una posición intermedia y nuevamente la celulasa y la prueba abiótica son las que obtuvieron el rendimiento más bajo.

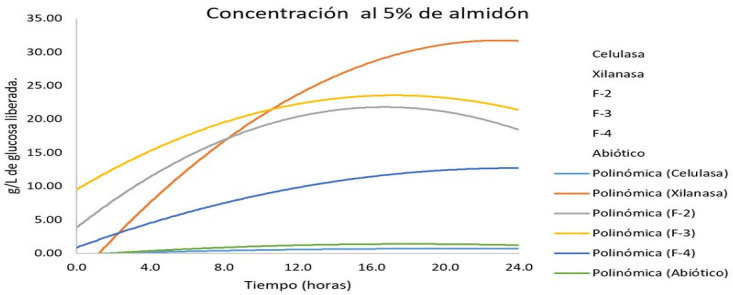


Figura 5. g/L de glucosa liberada con una concentración al 5%

Por lo que se puede deducir que el rendimiento entre ambas concentraciones varía obteniendo mejores resultados a una concentración al 1% de almidón, en ambos casos la xilanasa resulto ser la enzima con mejor rendimiento, la celulasa y la prueba abiótica obtuvieron el rendimiento más bajo; esto debido a los factores que se mencionaron con anterioridad.

Se realizó una comparación del rendimiento de las dos concentraciones, para ello se promediaron los resultados de glucosa obtenida por cada enzima en las dos concentraciones. En la *Figura 6 s*e observa que la Xilanasa a una concentración de 1% de almidón obtiene el mejor rendimiento ya que alcanzó un promedio de 49.75 g/L de glucosa, en comparación con la Xilanasa al 5% que alcanzó un promedio de 9.61 g/L de glucosa liberada. Es decir, la Xilanasa a una concentración de 1% es mucho más eficiente. En el caso de la celulasa se observó que en ambas concentraciones tiene un rendimiento muy deficiente debido a la dilución inicial que se hizo con esta enzima. Lo mismo sucede con la prueba abiótica; se observa claramente que en ambas concentraciones el rendimiento es muy precario obteniendo valores muy bajos de glucosa.

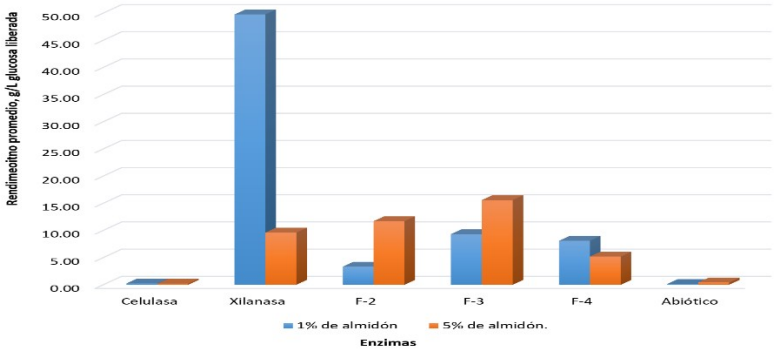


Figura 6. Promedio del rendimiento de enzimas según la concentración.

4.3. Obtención y adición de vitamina C

La muestra analizada tenía presencia de vitamina C,lo que indica como resultado que mientras la coloración de los tubos sea más cristalino mayor será la concentración de vitamina C dentro de la muestra analizada y se obteniendo un resultado de 0.0019212 g de vitamina C. De igual manera se realizó una lectura de infrarrojo de la muestra de polvo de cascara de naranja obteniendo la siguiente lectura IR que se muestra en la figura 7.

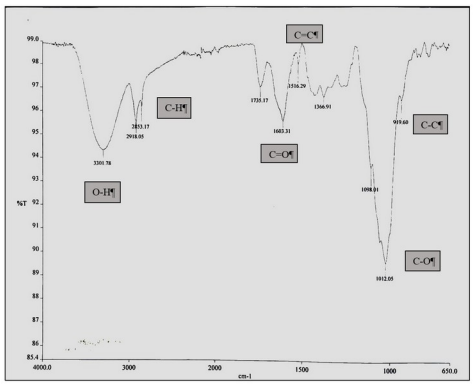


Figura 7. IR de polvo de cáscara de naranja (Vitamina C).

La lectura del espectro fue corroborada de acuerdo a la estructura molecular del ácido ascórbico y se identificó la presencia de los grupos funcionales característicos de dicho compuesto, los cuales fueron los enlaces O-H que se encuentran dentro del primer pico del IR el cual obtiene un valor de 3301.78, el segundo grupo funcional identificado es el C-H el cual se encuentra ubicado a un costado del enlace O-H, este obtuvo un valor de 2853.17, también se encuentran enlaces dobles de C=O y C=C los cuales tienen valores de 1603.31 y 1366.91 respectivamente. De igual manera están presentes los enlaces simples C-O y C-C los cuales tienen valores de intensidad de 1012.05 y 919.60, esto indica que todos los grupos funcionales que teóricamente se sabe que se encuentran en una molécula de ácido ascórbico si se encuentran presentes dentro de la muestra que del polvo de naranja que se analizó. Una vez obtenido esto, se procedió una vez más a realizar el proceso de hidrólisis enzimática con la enzima xilanasa, la primera lectura IR que corresponde a la muestra de glucosa se muestra en la *Figura 8.*

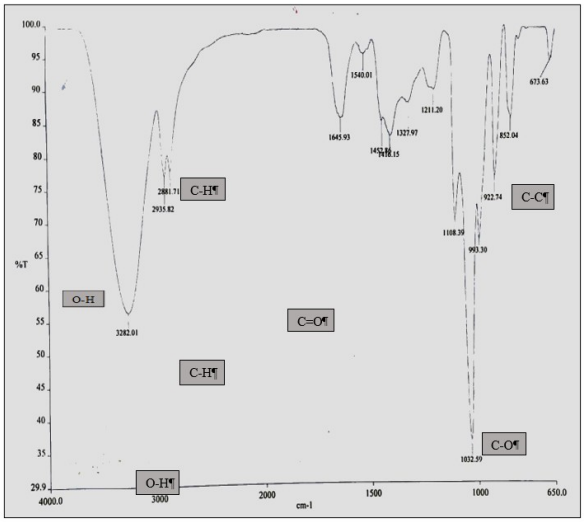


Figura 8. Lectura del IR de Glucosa Liberada.

En dicha lectura se puede observar como la molécula de almidón se degradó dando paso a una molécula de D-Glucosa, esto se puede corroborar mediante la identificación de enlaces y/o grupos funcionales que se encuentran presentes dentro de la muestra analizada, los enlaces simples O-H y C-H tiene un valores de 3282.01 y 2881.71 respectivamente, los enlaces C-O y C-C poseen valores de intensidad de 1032.59 y 922.74 lo que corrobora que en efecto a partir de la hidrólisis de almidón se obtuvo D-Glucosa, Posteriormente se realizó la prueba de IR a una última muestra de la glucosa enriquecida con vitamina C, el IR obtenido se observa en la *Figura 9* Mediante la lectura de IR de la glucosa enriquecida se observa que hay un ligero cambio en comparación con la lectura de glucosa sin vitamina, en esta se pueden distinguir los dobles enlaces de C=O y C=C que se encuentran presentes en el ácido ascórbico teniendo valores de 1645.95 y 1539.91 respectivamente.

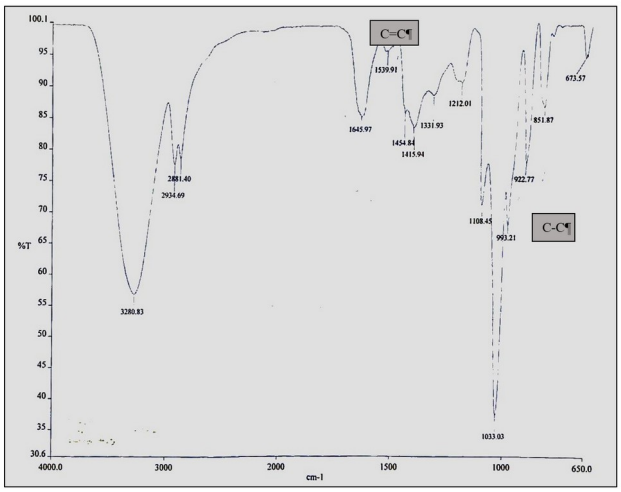


Figura 9. Lectura de IR de glucosa enriquecida con vitamina C.

5. Conclusiones

Es posible emplear el almidón de papa *Oxalis Tuberosa*, como una fuente potencial de almidón comercial. Se obtiene de 7000 gr de papa *Oxalis Tuberosa* una cantidad de 105.1 gr de almidón lo que equivale a 1.5% del total de materia prima; además el almidón de papa posee propiedades fisicoquímicas similares al almidón de maíz, dentro de las propiedades fisicoquímicas, la temperatura de gelatinización es de 57.9 °C,

La cuantificación de azucares reductores con el método DNS, demuestra la precisión del método aplicado a las 2 concentraciones manejadas, de las 5 enzimas empleadas cabe destacar que la enzima que obtuvo un mejor rendimiento es la enzima Xilanasa; esta logro obtener

concentraciones máximas de 67.82 y 31.15 g/L de glucosa liberada en concentraciones de 1% y 5% de almidón, en contraste con la enzima Celulasa la cual fue la enzima con menos resultados favorables obteniendo valores máximos de 0.94 y 0.96 g/L de glucosa liberada respectivamente.

En cuanto a la adición de vitamina C se puede concluir que mediante la técnica de IR puede identificar la presencia de los grupos funcionales característicos del ácido ascórbico dentro de la muestra de glucosa, pero en la lectura no se observó un cambio muy marcado en las diferencias del IR de glucosa comparado con el IR del ácido ascórbico.

Es posible obtener glucosa a partir de la hidrólisis enzimática de almidón de papa extranjera (Oxalis tuberosa), utilizando la enzima Xilanasa, ya que obtiene una mejor eficiencia en comparación con las demás enzimas. Esto indica cómo se mencionó anteriormente que la papa *Oxallis Tuberosa* es una muy buena alternativa para obtención de almidón y producción de edulcorante ya que en relación con otras fuentes de obtención esta tiene muy buen aprovechamiento.

6. Bibliografía

1. Cruz, G., “Glucosa obtenida a partir de hidrólisis enzimática de almidón de Jícama *Pachyrhizus Erosus"* fortificado con vitamina C. Trabajo de pregrado. Orizaba, Veracruz.
2. Badelt, M., “Formulación de un extracto multienzimatico para la obtención de azúcares fermentables a partir de celulosa comercial y bagazo de caña”. (Tesis de pregrado). Universidad Veracruzana, Orizaba, Veracruz, 2019.
3. 3 Carapia, M., Aprovechamiento del olote de maíz para la extracción alcalina de xilan y producción de xilanasas fúngicas. (Tesis de pregrado). Orizaba Veracruz, 2018.

Producción de ácido cítrico con Aspergillus niger a partir de mieles finales de la caña de azúcar

Quintana D. Berenice [1], Rojas M. Jocelyn [2], Contreras L. José Luis[3], Nuño L. Leticia[4], Luna P. Ricardo[5].

[1]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email mbqd@azc.uma.mx,

[2] Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email raventtgo@gmail.com,

[3]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email jlcl@azc.uam.mx,

[4] Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email lnr@azc.uam.mx,

[5] Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email lpr@azc.uam.mx,

1.- Resumen

Con la intención de aprovechar un subproducto de la industria azucarera mexicana, se examinan las mieles finales de la caña (melaza) como sustrato para la producción de ácido cítrico empleando *Aspergillus niger*. Para este sustrato se realizó una comparación con o sin tratamiento de hidrólisis ácida, para poder comparar la producción de ácido cítrico al proporcionarle al hongo una fuente de carbono más o menos fácil de asimilar. El sustrato también recibió un tratamiento con resina de intercambio catiónico, para la reducción y/o remoción de los elementos traza que influyen en el proceso de fermentación. El hongo *Aspergillus niger,* fue seleccionado por su facilidad de manejo, su capacidad para fermentar una gran variedad de sustratos y su alto rendimiento. El proceso de fermentación se desarrolló en cultivo sumergido en un reactor agitado con rastreo de las variables en el tiempo.

2.- Introducción.

El ácido cítrico es un producto con una gran demanda mundial, debido a sus aplicaciones en la industria farmacéutica, alimentaria, cosmética, plásticos, detergentes y en la manufactura de tintas y colorantes. La producción industrial de ácido cítrico se realiza por fermentación a partir de microorganismos como levaduras, bacterias, hongos.

La producción de azúcar en México durante 2019 alcanzó los 6,425,000 toneladas, de las cuales se obtuvieron 2,030,000 de toneladas de melaza, el uso de este recurso es principalmente como alimento para ganado y se busca maximizar su aprovechamiento con la producción de ácido cítrico.

El contenido de azucares en la melaza es de 40-50% en forma de sacarosa, glucosa y fructosa. Se ha reportado que la sacarosa es la fuente de carbono más conveniente seguida de la glucosa, fructosa y lactosa [1]. El *Aspergillus niger* puede consumir rápidamente azucares simples como glucosa y fructosa, el microorganismo posee un enlace en el micelio que hidroliza la sacarosa en sus monómeros [2].

En la producción de ácido cítrico por *Aspergillus niger,* la temperatura, el pH, agitación, fuente de carbono y nitrógeno, iones metálicos, niveles de nutrientes, concentración de fosfato, son los principales factores que regulan la morfología del microorganismo y el proceso fermentativo [2,3].

3. Condiciones experimentales

El hongo de Aspergillus niger fue adquirido del Centro de Investigación y de Estudios Avanzados del Instituto Politécnico Nacional con la clasificación CDBB623. Para la

preservación de la cepa se empleó Agar de dextrosa y papa (PDA), en tubos de agar inclinado incubados a 28°C durante 6 días y posteriormente mantenidos en refrigeración a 4°C.

La melaza como subproducto de la industria azucarera es una fuente de carbono, cuya composición es: 23.4% o menos de agua, 53.5% o más de azúcares y 23.1% o menos de no azucares. Los azucares están compuestos de (60% - 63%)en peso sacarosa, (6% - 9%en peso) glucosa y (5% - 10% en peso) fructosa y los no azúcares están compuestos por 33% de sustancias inorgánicas (Fe^{3+}, K^{+}, Na^{+}, Ca^{2+}, Mg^{2+}, Zn^{2+}, As^{3+}, Cd^{2+}, Hg^{+}, Pb^{+} y Cl^{-}, NO_3^{-}, SO_2^{-}), 42% corresponde a sustancias nitrogenadas (aminoácidos, péptidos, colorantes) y el 25% de sustancias orgánicas libres de nitrógeno (ácidos carboxílicos, alcoholes, fenoles, ésteres, vitaminas, gomas y dextranos)[4].

La melaza es rica en compuestos que contienen nitrógeno y raramente se tienen que sustituir con alguna otra fuente del mismo [7]. La concentración de fósforo requerida por el hongo para una máxima producción de ácido cítrico es 0.5 a 5 g/l [6].

Pretratamiento de la melaza. La hidrólisis ácida se llevó a cabo para incrementar la disponibilidad de la melaza y elevar la producción de ácido cítrico, se utilizó el procedimiento propuesto por Sikandier [7], el cual consiste en diluir al 25% el nivel de azúcar de la melaza, agregando 35 ml de H_2SO_4 1N por cada litro de solución y hervir durante media hora, dejar enfriar y neutralizar la solución con CaO, dejar reposar durante 12 horas para que se lleve a cabo la clarificación. Finalmente diluir al 15% el sobrenadante líquido.

Con la finalidad de remover los iones de metales pesados, se agregó una cantidad de resina al sustrato manteniéndolo agitado por 30 minutos para después filtrar. No todos los iones deberán ser removidos durante este proceso puesto que algunos de ellos, son necesarios para el crecimiento del micelio de Aspergillus niger [8].

La concentración inicial de melaza utilizada para cada sustrato fue de 150g por litro de solución, a excepción de los sustratos hidrolizados donde la concentración fue de 37.5 g por litro de solución (Tabla 1).

Tabla 1. Condiciones de experimentación utilizadas en la fermentación.

Experimentación	Medio 1	Medio 2	Medio 3	Medio 4
Fuente de carbono (g/l)	37.5	37.5	150	150
Gramos de resina catiónica	350	175	175	350
Hidrólisis	si	si	no	no

El inoculo consistió en una suspensión de esporas, que se produjo por lavado del cultivo del hongo. La técnica consistió en agregar una solución salina estéril (0.85% NaCl) y agitar vigorosamente durante un minuto, con la finalidad de arrastrar las

esporas maduras. El inoculo representó el 1% (v/v) del volumen de operación del reactor (2.1 l).

Para llevar a cabo la fermentación sumergida, se adicionó el inoculo a un reactor de vidrio, enchaquetado con agitación mecánica por medio de un impulsor tipo Rushton de cuatro paletas de acero inoxidable (200 rpm). La agitación intensiva está asociada al desarrollo de los filamentos que producen el ácido cítrico, además, el esfuerzo cortante puede causar la ruptura de los filamentos que a su vez generan nuevos filamentos productores de ácido cítrico [3].

El aire se hizo pasar a través de una manguera conectada a una línea de aire estéril, con un flujo (5 l/min) controlado mediante un rotámetro. La temperatura del reactor se mantuvo 30±2°C por medio de la chaqueta del reactor. La biomasa fue separada mediante filtros (0.45 µm de apertura de poro) y un sistema de vacío (figura 2). El periodo de fermentación fue de diez días con toma de muestra diaria.

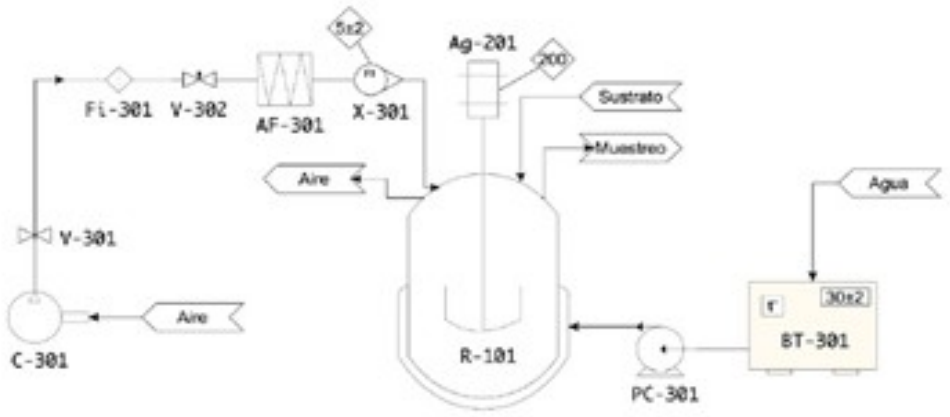


Figura 2. Diagrama de flujo de proceso.

Nomenclatura empleada en el diagrama, R-101 reactor enchaquetado, Ag-201 agitador 200 rpm, C-301 compresor de aire, V-301 válvula, Fi-301 filtro de membrana, V-302 válvula de aguja, AF-301 filtro de alúmina y fibra de vidrio, X-301 Rotámetro, PC-301 Bomba centrífuga, BT-301 Baño termostático.

El pH para la producción de ácido cítrico debe ser menor a 2, esto reduce los riegos de contaminación de la fermentación con otros microorganismos e inhibe la producción de ácidos orgánicos no deseados (ácido glucónico y ácido oxálico) [9]. El pH inicial entre 5.4 –y 6.5 es el óptimo para la melaza [1].

Para la determinación de ácido cítrico se utilizó el método de Marrier y Boulet [11], el cual consiste en añadir anhídrido acético en exceso caliente y piridina a una muestra líquida de ácido cítrico en condiciones de sequedad total. Bajo estas condiciones, el ácido cítrico, con la adición de la piridina da un color amarillo, el cual es proporcional a su

concentración. La concentración se determinó, por la medición de la absorbancia a 405 nanometros en un espectrofotómetro visible marca Spectronic Instruments modelo 21D.

Para la determinación de azúcares, se midieron los ° Brix de las soluciones por medio de un refractómetro marca Atago IT modelo NAR-it. La biomasa producida durante la fermentación, se calculó separándola del medio de cultivo por filtración en membranas, llevándolas a peso constante a 50°C, utilizando la diferencia de pesos, dividido entre el volumen de la muestra [10].

5.- Resultados y discusión.

Para la primera experimentación, la mayor producción de ácido cítrico se registró al tercer día de fermentación con 22 mg/ml, después decayó notablemente en el quinto día y de ahí hasta el noveno día la producción disminuyó de manera constante. Los azúcares se consumieron de manera prácticamente constante y la generación de biomasa aumento lentamente conforme transcurrieron los días de la fermentación, el hongo no logro crecer. La cantidad de ácido cítrico es determinada par el crecimiento del Aspergillus niger y por el tratamiento de hidrólisis del sustrato, aunque después del quinto día la producción del ácido cítrico es menor, suceso posiblemente influenciado por la menor cantidad de azucares disponibles (figura 3).

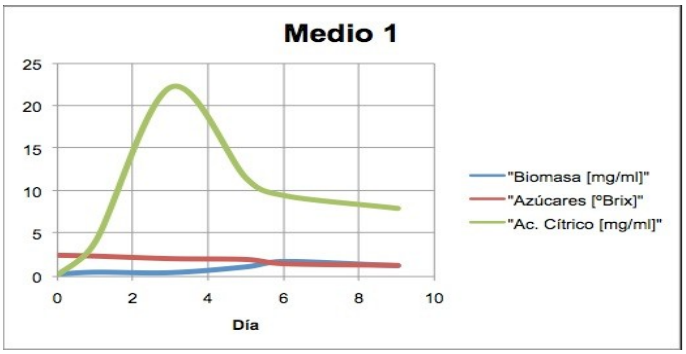


Figura 3. Producción de ácido cítrico, primer experimento.

Para la segunda experimentación la mayor producción de ácido cítrico se registró al tercer día de fermentación con 2.2 mg/ml, a pesar de que el sustrato fue hidrolizado. La cantidad de azucares decae de 2.5 a 1.3° Brix, lo que indica que el hongo Aspergillus niger no creció y por consiguiente no hubo transformación de los azucares. En cuanto a la generación de biomasa el valor máximo obtenido fue de 3.4 mg/ml el primer día. Posiblemente coexisten metales traza que impiden una buena fermentación (figura 4).

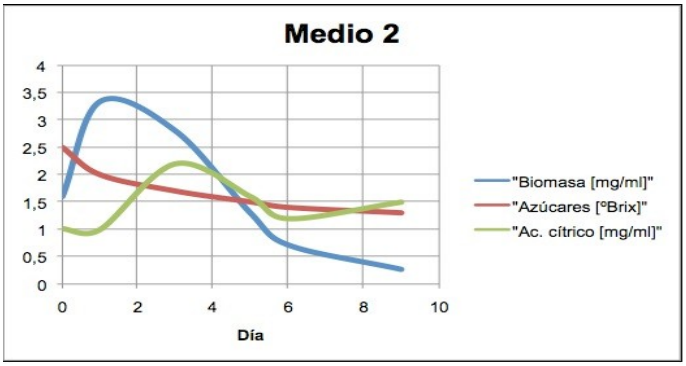


Figura 4. Producción de ácido cítrico, segundo experimento.

Para la tercera experimentación, la máxima producción de ácido cítrico se alcanzó en el quinto día con una producción de 16 mg/ml, la cantidad de azucares disminuyo de 12 a 9°Brix, la biomasa generada 26 mg/ml es mayor que la cantidad de ácido cítrico producido. En este caso el tratamiento fue con 175 g de resina catiónica por litro de solución (figura 5).

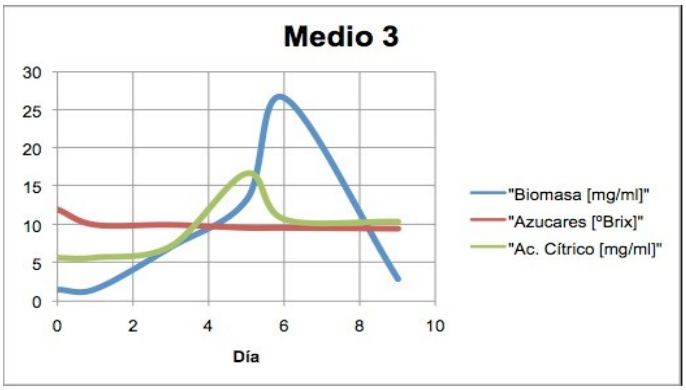


Figura 5. Producción de ácido cítrico, tercer experimento.

Para la cuarta experimentación se alcanzó la mayor producción de ácido cítrico, 39 mg/ml en el quinto día. La variación de los azucares de 15 a 12° Brix. La cantidad máxima de biomasa fue de 23 mg/ml. Esta fermentación presenta las mejores condiciones de operación debido a que se da la mayor producción de ácido cítrico cuando disminuye la cantidad de azucares y el aumento en la biomasa (figura 6).

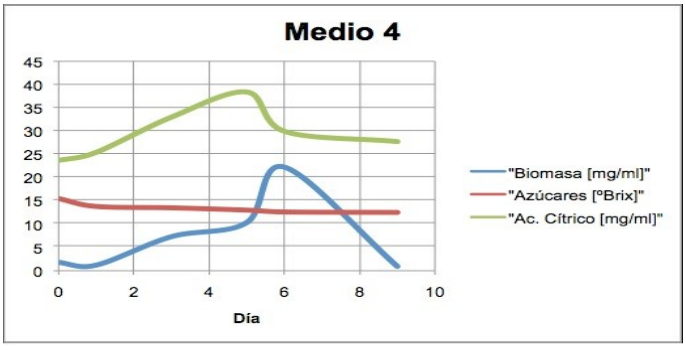


Figura 6. Producción de ácido cítrico, cuarto experimento.

5.- Conclusiones

En el periodo evaluado, la máxima producción de ácido cítrico se obtuvo entre 3-5 día, aunque su cantidad despende de las condiciones en las que se realizó la fermentación. La hidrólisis favorece la producción de ácido al aumentar la disponibilidad de la melaza, debido a la transformación de sacarosa a glucosa y fructosa que son consumidos por el hongo *Aspergillus niger* para la producción de ácido cítrico. El tratamiento con resina catiónica fue necesario para la remoción/reducción de los elementos traza, aunque se corre el riesgo de eliminarlos y evitar las mejores condiciones de fermentación porque algunos de ellos son requeridos. No fue necesario el suministro de una fuente de nitrógeno para la producción del ácido cítrico. En la mayoría de los experimentos se aprecia un aumento en la cantidad de biomasa al disminuir la producción de ácido cítrico.

6.- Bibliografía.

[1] Grewal H., & Kalra K. (1995). Fungal production of citric acid. *Journal of Biotechnology Advances.* Vol. 13. pp. 209-234.

[2] Hossain et al. (1984). The effect of sugar source on citric acid production por A. niger. *Appl. Microbiol. Biotechnol.* Vol.19. pp. 393-397.

[3] Papagianni, M., Mattey M., Kristiansen, B. (1999). The influence of glucose concentration on citric acid production and morphology of Aspergillus niger in batch and fed-batch culture. *Enzime Microb. Technol.* Vol.25 pp. 710-717.

[4] Association of America Feed Control Officials. https://www.aafco.org/

[5] Mattey M. (1992). The production of organic acids. *Crit. Rev. Biotechnolog.* Vol.12 pp.87-132.

[6] Shu, P., Johnson M. (1948), Citric acid production by submerged fermentation with Aspergillus niger. *Ind. Eng. Chem.* Vol.40. pp.1202-1205.

[7] Sikander A., Haq I., Qadeer M. A., Iqbal J. (2002). Production of Citric Acid by Aspergillus niger using cane molasses in a stirrer fermentor. *Electronic Journal of Biotechnology.* Vol. 5.

[8] Lesniak W. (1999). *Citric acid biotechnology; fermentation substrates.* Ed. Kristiansen B. Mattey M. and Linden J. London, Taylor Fransic Ltd. pp. 149-159.

[9] Saffran M Denstedt F. (1948). *A rapid method for the determination of citric acid.* Department of Biochemistry. Montreal Cánada.

[10] Jiménez G. J. C., Pérez E. T. (2004). Estudio cinético de la obtención de ácido cítrico, en un biorreactor a nivel laboratorio y planta piloto. Tesis de licenciatura. Universidad Autónoma Metropolitana.

Sistema de control basado en la reconfiguración de una red neuronal artificial para estimar conjuntos de movimientos en robots modulares tipo cadena

Arenas Morantes, Angie[1], Rincón Cevallos, Angie[1], Pedraza, Luis Fernando[1], Hernández Martínez, Henry[1], Cadena, Ernesto[1].

[1]Universidad Distrital Francisco José de Caldas.

aaarenasm@correo.udistrital.edu.co,aprinconc@correo.udistrital.edu.co ,lfpedrazam@udistrital.edu.co,hahernandezm@udistrital.edu.co, ecadenam@udistrital.edu.co.

1. Resumen

Los sistemas de múltiples robots (robots modulares) son estructuras flexibles que realizan movimientos al coordinar un conjunto de articulaciones. Sin embargo, la complejidad de generar un movimiento varía en función de la morfología del robot, por lo tanto, al aumentar la cantidad de articulaciones, también lo hace la dificultad para planificar un movimiento. En este trabajo se propone una forma de control para robots modulares en configuraciones de tipo cadena, que le permite al robot recorrer diferentes entornos al modificar la configuración de una RNA (Red Neuronal Artificial) mediante un algoritmo de entrenamiento adaptativo. Este algoritmo estima los parámetros de la RNA en un entorno virtual que implementa tres escenarios diferentes con superficies planas u obstáculos. Finalmente, los parámetros estimados en el simulador se envían al robot modular EMERGE, para evaluar el rendimiento del sistema de control en entornos reales con las mismas características del entorno virtual.

2. Introducción

Un robot modular es una estructura compuesta por múltiples robots, que se combinan en diferentes configuraciones para realizar varios tipos de tarea. Algunas de estas tareas comprenden desde movimientos simples como girar o avanzar hasta algunos movimientos compuestos como arrastrarse o caminar. El alcance y forma de los movimientos de la estructura robótica ensamblada depende de la forma y la cantidad de grados de libertad de cada módulo, ya que, estas variables pueden aumentar la capacidad de procesamiento requerida para sincronizar las articulaciones de cada módulo [1,2].

Existen diversas formas de módulos, debido a que los acoples electro-mecánicos determinan la forma de las caras. Los acoples le permiten al usuario conectar los módulos en configuraciones de conectores macho (con sobresaltos) y hembra (con ranuras) o hermafroditas (combinan ranuras y sobresaltos), en algunas ocasiones estos conectores incorporan buses de conexión para energizar el módulo y/o compartir información entre ellos [3].

La información que viaja entre los módulos define la posición de cada articulación, lo que le permite al robot realizar un movimiento. Sin embargo, existe la posibilidad de que los paquetes de información que viajan a través de los buses del robot se pierdan, ya que, los módulos están sujetos a desconexión mientras se mueven, o puede que, el controlador del robot envié más paquetes de los que los módulos pueden procesar. El manejo de los paquetes de información aumenta su complejidad al aumentar los grados de libertad del robot, debido a que, la capacidad de procesamiento del controlador varía en función de la cantidad de sensores, la velocidad de los actuadores del robot y la configuración del controlador [4-5].

La velocidad de procesamiento es un factor determinante durante la ejecución de diversas tareas, ya que, reduce o aumenta la velocidad del movimiento y así mismo la duración de una tarea. Algunos algoritmos de control le permiten al usuario reducir la velocidad de procesamiento hasta el punto en que los movimientos repetitivos parecen ejecutarse en tiempo real o guardar conjuntos de memoria del robot para luego enviarlos en cada articulación y ejecutarlos de manera cíclica para evitar el retraso de transito del paquete a través del bus [6].

Las formas de control de un robot modular pueden ser centralizadas, descentralizadas o hibridas. En el primer caso el control de la estructura se encuentra embebido en un único dispositivo. En el segundo caso, el controlador puede ser cualquier módulo de la estructura. En el tercer caso, el controlador incorpora características de los controladores mencionados anteriormente, es decir, hay un controlador central que envía parámetros a los módulos que traducen dicha información para efectuar una tarea [7-8].

Como se observa existen muchas formas de controlar un robot modular [9]. No obstante, la perdida de información durante la desconexión del controlador o la perdida de paquetes son casos de estudio para los investigadores en esta área, ya que, al haber perdida de paquetes se incrementa el tiempo de procesamiento del robot, lo que reduce su eficiencia. Por lo tanto, en este trabajo se propone una solución parcial a este problema mediante un controlador inalámbrico que construye el recorrido del robot a partir de una simulación realizada en un computador. Este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: En la sección 3 se encuentra una descripción detallada del experimento realizado para controlar el robot. En la sección 4 se encuentran los principales resultados obtenidos con la ejecución del simulador y el movimiento real del robot.

3. Desarrollo del sistema

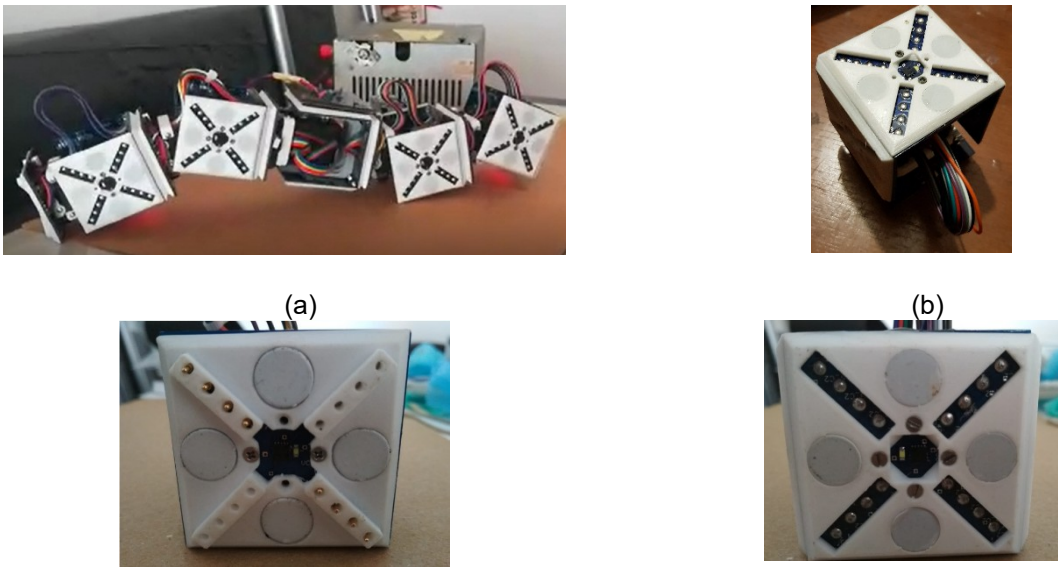
Los robots modulares y la robótica modular son un tema en desarrollo, por lo tanto, en esta sección se presentan los conceptos necesarios para comprender el funcionamiento del robot EMERGE, la forma de control y una descripción de los experimentos realizados para probar el controlador.

3.1. El robot EMERGE

El robot EMERGE (Figura 1a) es un prototipo de uso libre, es decir, los materiales, circuitos eléctricos y el procedimiento necesario para su ensamblaje se encuentran disponibles en un repositorio[2]. Además, este prototipo es flexible lo que le permite al usuario adaptar los circuitos a sus necesidades particulares [9-12]. Por ejemplo, en este caso se agregó al robot un circuito impreso que le permite comunicarse con el computador usando las tecnologías inalámbricas WiFi y LoRa.

[2] Disponible en: https://sites.google.com/view/emergemodular

Básicamente, este robot se compone de varios módulos (Figura 1b) cuya agrupación depende del usuario. Cada módulo tiene cuatro caras con imanes que le permite conectarse con otros módulos. Además, el exterior de una de las caras tiene una forma sellada con sobresaltos (conector macho, Figura 1(c)) y las otras tienen formas ranuradas (conector hembra, Figura 1(d)). Bajo cada cara hay un circuito impreso de dos caras: En la parte superior tiene cuatro (4) puntos de conexión para energizar y compartir información entre módulos. La información se comparte usando el protocolo CAN (del inglés, Controller Area Network) que le permite al controlador empaquetar, enviar y recibir la información desde un módulo o dispositivo especifico, así la comunicación se realice a través de un solo bus. En la parte inferior de cada circuito impreso se encuentra un controlador local que controla el motor del módulo a partir de los parámetros recibidos por el controlador [9-12].

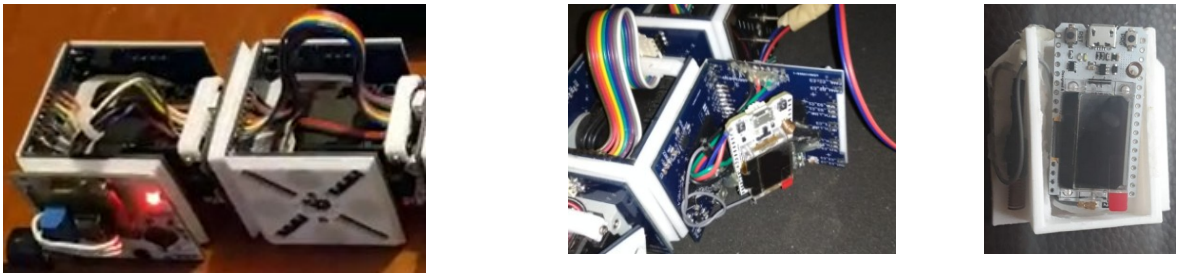


(a) (b)

(c) (d)

Figura 1. Robot modular EMERGE: (a) Ejemplo de ensamble, (b) Modulo del robot, (c) Conector macho y (d) Conector hembra

La forma de control tradicional del robot EMERGE se basa en un controlador centralizado (Figura 2a) que se implementa sobre la plataforma, es decir, el controlador tiene un algoritmo de control embebido que se ejecuta en tiempo real durante el funcionamiento de la plataforma [9]. Sin embargo, cuando la plataforma se apaga o algún modulo se desconecta el controlador se desincroniza y el robot deja de moverse, lo cual se reduce al implementar la estrategia de control propuesta en este artículo.



(a) (b) (c)

Figura 2. Controladores locales: (a) Tradicional, (b) Modulo LoRa para el robot y (c) Modulo LoRa para el PC

Esta estrategia modifica la forma de control actual con base en un algoritmo evolutivo que se ejecuta en el controlador de manera local. Lo anterior se consigue, generando los parámetros de control en un computador y enviándolos al robot a través de un dispositivo que utiliza tecnología LoRa (Figura 2b y 2c). Este dispositivo reduce la cantidad de cables, ya que inalámbricamente se conecta con otro dispositivo LoRa conectado al robot que envía la información recibida a cada módulo a través del bus CAN [9].

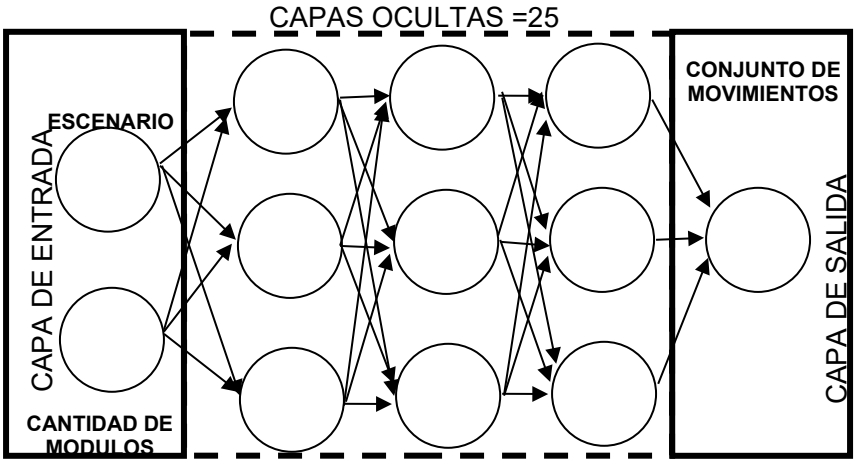
Los parámetros de control determinan las posiciones de cada módulo las cuales se estiman en un programa de simulación. El programa implementa una rutina de funcionamiento que le permite al usuario escoger entre dos modos de funcionamiento: Uno de ellos es el modo manual, donde los movimientos del robot se encuentran predefinidos y el otro es el modo automático donde el simulador usa los resultados proporcionados por una RNA para calcular la posición de cada módulo.

Una RNA es un modelo inspirado en el funcionamiento de una red de neuronas, es decir, este modelo conexionista estima un valor de salida a partir del recorrido que realice un conjunto de datos de entrada. Este valor de salida depende de los coeficientes o pesos estimados con un algoritmo de entrenamiento al momento de enseñar los datos de entrenamiento, que básicamente son conjuntos de datos donde el usuario asocia unos valores de entrada a lo que espera como resultado o valor de salida [13-15].

En este caso se implementó una RNA (Figura 3a) de retro-propagación (del inglés, back propagation) que implementa un algoritmo de entrenamiento por corrección del error hacia atrás. Es decir, se utiliza un conjunto de datos inicial para estimar un valor de salida, el cual se compara con un conjunto de datos de entrenamiento (Tabla 1) para estimar el margen de error. Además, este algoritmo reorganiza o actualiza los pesos de las capas intermedias de la red de cada capa para reducir el error. En este caso, el conjunto de datos de entrenamiento es una base de datos que tiene la siguiente información: cantidad de módulos, forma del entorno y las posiciones de los módulos. Donde las entradas de la RNA son la forma del entorno y la cantidad de módulos, y la salida son las posiciones de los módulos.

Las posiciones de los módulos se estimaron de forma manual, es decir, se midieron todos los ángulos y posiciones de los módulos necesarias para que el robot se desplazara de un punto a otro en cada entorno real. Luego estos movimientos se cargaron al simulador y se probaron con los

módulos virtualizados y por último se entrenó la RNA para reproducir el conjunto de movimientos dado (Figura 3b).



(a)

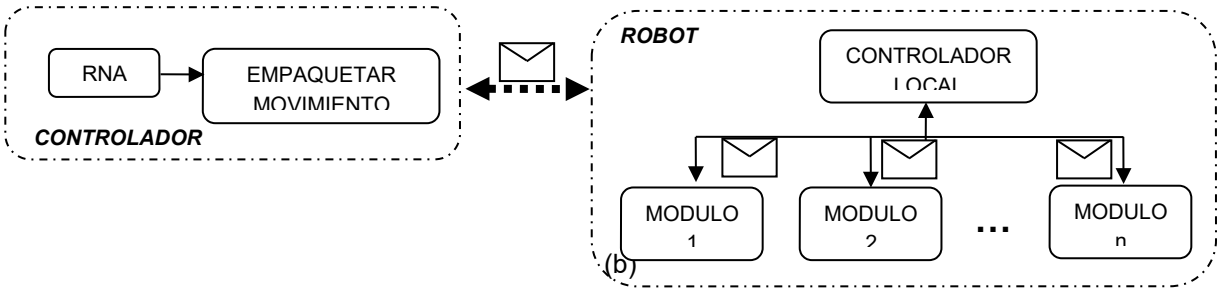


Figura 3. Configuración de la RNA: (a) Implementación de las capas y (b) Controlador del robot

Tabla 1. Segmento de la base de datos utilizada para entrenar la RNA

Entradas		**Salidas**			
Escenario	**Cantidad de módulos**	**Modulo 1**	**Modulo 2**	**Modulo 3**	**Modulo 4**
1	4	0	20	40	60
1	4	25	45	65	85
1	4	50	70	90	110
1	4	75	95	115	135
1	4	100	120	140	160
1	4	125	145	165	185

El entorno de realidad virtual y el TOOLBOX de MATLAB se utilizaron para reproducir los movimientos del robot al terminar de entrenar la RNA como se muestra en el Algoritmo 1. Esta estrategia de control se ejecuta con un SCRIPT el cual envía los movimientos utilizando el protocolo serial y se implementó en un computador con 4Gb de memoria RAM y un procesador Intel Pentium Core I3. Finalmente, se realizaron las pruebas del robot en tres configuraciones de entorno diferente (Figura 4).

Algoritmo 1. Esquema de control utilizado

Función RNA (Margen de error)

Iniciar variables ()

Umbral=4*10^-8

Iniciar RNA ()

Iniciar pesos de la RNA ()

Establecer la función de activación en la RNA ()

Expandir capas ocultas de la RNA ()

Mientras Umbral **menor que el** Margen de error **haga**

Optimice los pesos de la RNA ()

Estime el margen de error

Fin Mientras

Exportar clase RNA ()

Ejecute Simulador ()

Fin RNA

Función Simulador ()

Cargar librerías ENTORNO DE REALIDAD VIRTUAL

Cargar RNA

Iniciar variables

Iniciar puerto SERIE

Crear hilo de **recepción** del puerto de comunicación

Crear hilo de **envió** del puerto de comunicación

Iniciar objetos de la interfaz grafica

Iniciar RNA

Ingrese Cantidad de Módulos

Ingrese escenario

Duración=0

X=Posiciones angulares de los módulos = RNA (Escenario, Cantidad de Módulos)

Mientras Duración < 1000 **haga**

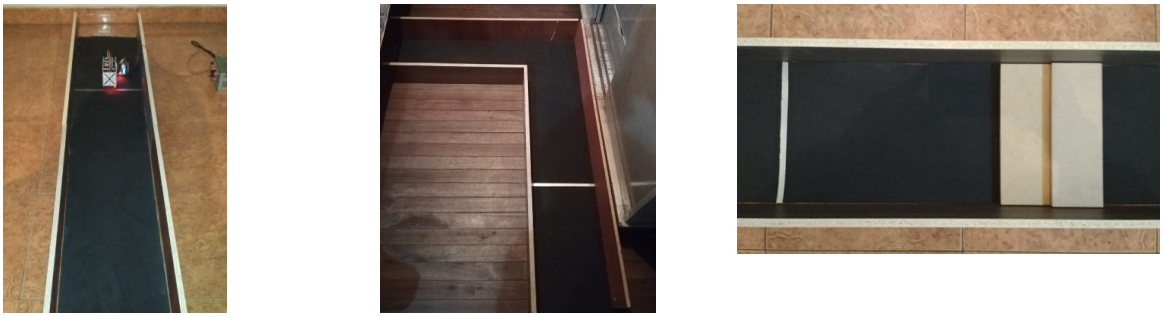
Enviar por puerto serie (X [Duración])

Enviar a entorno de realidad virtual (X [Duración])

Ejecute la rutina de movimiento durante 100 milisegundos

Duración++

Fin Mientras

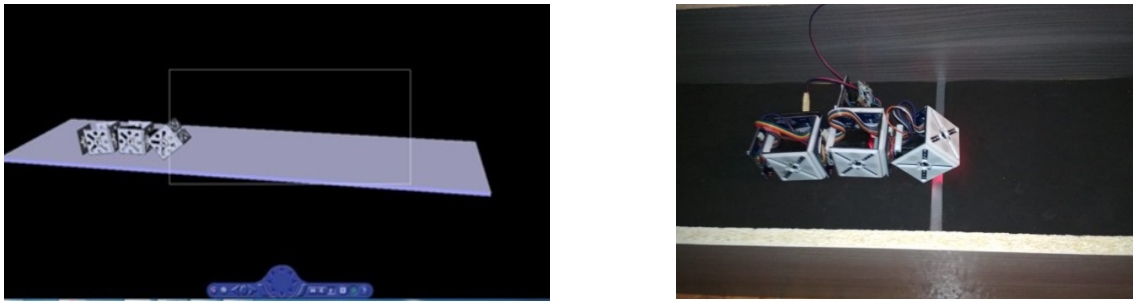


(a) (b) (c)

Figura 4. Entornos usados para probar el algoritmo de control (a) Pasillo recto, (b) En forma de ele y (c) Obstaculo

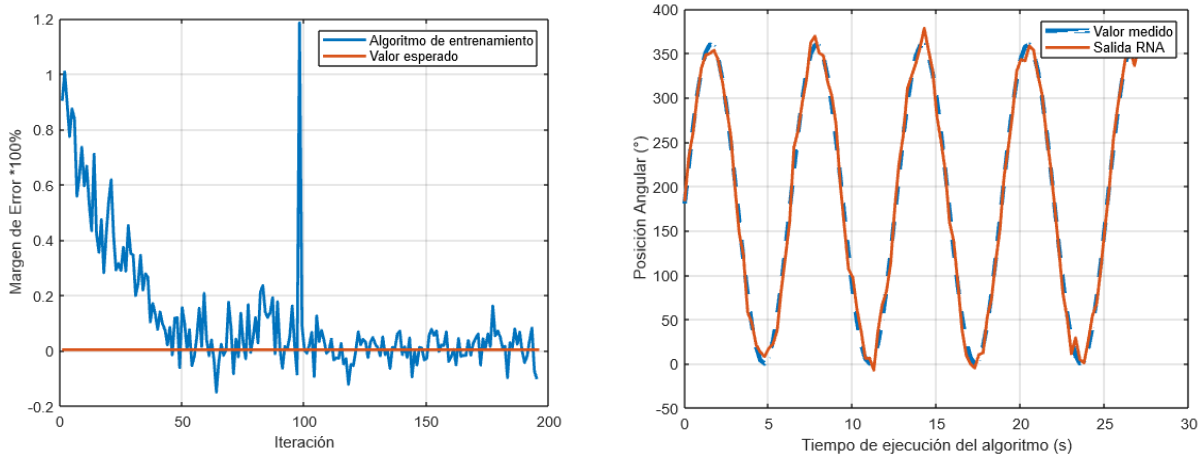
4. Resultados y discusión

Al combinar la RNA con el simulador se obtuvieron movimientos cercanos a los proyectados en la base de datos, los cuales permiten al robot desplazarse en los entornos propuestos de forma virtual y real como se muestra en la Figura 5. Además, otro resultado importante se ve reflejado en las gráficas de la Figura 6, ya que muestran el comportamiento de la RNA durante su entrenamiento y el margen de error entre los datos de entrenamiento y los datos reales.



(a) (b)

Figura 5. Simulación realizada con una configuración del robot de tres modulos: (a) Entorno virtual y (b) Entorno real



(a) (b)

Figura 6. Comportamiento de la RNA al intentar predecir los datos de la base de dato: (a) Respuesta del algoritmo de entenamiento y (b)Salida de la RNA vs el valor medido para en un solo modulo.

Finalmente, una vez establecida la configuración de la RNA más apropiada para controlar el robot se probó la misma RNA cambiando la cantidad de capas ocultas y se obtuvieron los resultados presentados en la Figura 7.

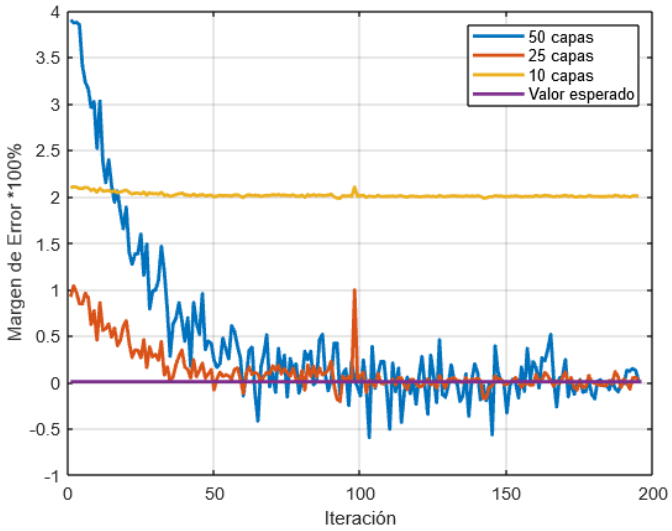


Figura 7. Comportamiento de la RNA con diferentes configuraciones de capas ocultas.

5. Conclusiones

En las Figura 5 y 6 se observa que es posible controlar un robot modular a partir de la salida reconstruida por una RNA de 25 capas ocultas, 2 entradas y 1 salida, la cual predice los movimientos del robot con un margen de error menor al 5% comparado con los movimientos construidos de forma manual. Además, se observa que este tipo de estrategia es adaptativa, es decir, con una sola configuración de RNA el robot recorre su entorno. Otra ventaja de esta estrategia de control es que el robot recorre su entorno a pesar de que un módulo llegue a fallar, ya que los parámetros de control son enviados desde un dispositivo externo y no dependen de la fuente de alimentación del robot.

El comportamiento de la RNA con diferentes configuraciones de capas ocultas muestra una región de trabajo óptima para generar el controlador del robot (de 20 a 30 capas), ya que, al aumentar (más de 50) o disminuir (menos de 10) en gran medida la cantidad de capas ocultas evita que el algoritmo de entrenamiento converja satisfactoriamente. Por un lado, al reducir la cantidad de capas ocultas el algoritmo de entrenamiento no converge, y por otro, al aumentar la cantidad de capas ocultas el algoritmo converge más lentamente; aunque el resultado obtenido no es mejor que el logrado en la región óptima de trabajo. De tal manera, que al seleccionar una cantidad de capas ocultas diferente a las de la región óptima de trabajo, con una cantidad de iteraciones de entrenamiento igual a las usadas para entrenar a la RNA en esta región de trabajo, conlleva a que el controlador no encuentre un conjunto de movimientos apropiado para que el robot se desplace de un lugar a otro.

Finalmente, Utilizando la tecnología LoRa se obtiene un beneficio de funcionamiento con respecto a la tecnología WiFi, ya que, el robot puede recorrer grandes distancias (hasta 3km con línea de vista) con un solo dispositivo de comunicación. Lo que reduce la cantidad de infraestructura necesaria para que el controlador envié los parámetros desde un terminal remoto.

6. Bibliografía

1. Jie Zhao, Yanhui Wei, Jizhuang Fan, Jun Shen and Hegao Cai, "New Type Reconfigurable Modular Robot Design and Intelligent Control Method Research," 2006 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, 2006, pp. 8907-8911.
2. C. Ye, N. Chen, L. Chen and C. Jiang, "A Variable-Scale Modular 3D Printing Robot of Building Interior Wall," 2018 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation (ICMA), Changchun, 2018, pp. 1818-1822.
3. J. Baca, M. Ferre, A. Campos, J. Fernandez and R. Aracil, "On the Analysis of a Multi-task Modular Robot System for Field Robotics," 2010 IEEE Electronics, Robotics and Automotive Mechanics Conference, Morelos, 2010, pp. 475-480.
4. H. Bin, H. L. Zhi, L. W. Zhen and L. Ming, "Feature-Based Modular Design Method and its Application in Robot," 2010 International Conference on Measuring Technology and Mechatronics Automation, Changsha City, 2010, pp. 256-259.
5. G. S. Hornby, H. Lipson and J. B. Pollack, "Evolution of generative design systems for modular physical robots," Proceedings 2001 ICRA. IEEE International Conference on Robotics and Automation (Cat. No.01CH37164), Seoul, South Korea, 2001, pp. 4146-4151 vol.4.

6. J. Campbell, P. Pillai and S. C. Goldstein, "The robot is the tether: active, adaptive power routing modular robots with unary inter-robot connectors," 2005 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems, Edmonton, Alta., 2005, pp. 4108-4115.
7. A. Katalin, "Data Acquisition for Pressure Monitoring and Control in Distribuited Systems," 2006 IEEE International Conference on Automation, Quality and Testing, Robotics, Cluj-Napoca, 2006, pp. 157-160.
8. Rodrigo Moreno, Frank Veenstra, David Silvera, Julian Franco, Oscar Gracia, Ernesto Cordoba, Jonatan Gomez and Andres Faina, 2018. "Automated Reconfiguration of Modular Robots Using Robot Manipulators". In Proceedings of IEEE Conference on Evolvable Systems, part of the 2018 Symposium Series on Computational Intelligence (IEEE-SSCI 2018), Bengaluru, India, November 18-23, 2018. In Press
9. Henry Hernández, Rodrigo Moreno, Andres Faina, and Jonatan Gomez, 2018 "Design of a bio-inspired controller to operate a modular robot autonomously". In Proceedings of the 16th Ibero-American Conference on Artificial Intelligence, Trujillo, Peru, November 13-16, 2018.
10. Rodrigo Moreno, Ceyue Liu, Andres Faina, Henry Hernandez, and Jonatan Gomez. 2017. " The EMeRGE modular robot, an open platform for quick testing of evolved robot morphologies". In Proceedings of GECCO '17 Companion, Berlin, Germany, July 15-19, 2017.
11. Ceyue Liu, Jiangong Liu, Rodrigo Moreno, Frank Veenstra and Andres Faina, 2017. "The impact of module morphologies on modular robots". ICAR 2017.
12. Frank Veenstra, Andres Faina, Sebastian Risi, Kasper Stoy, 2017. "Evolution and Morphogenesis of Simulated Modular Robots: A Comparison Between a Direct and Generative Encoding". Evostar 2017, In press.
13. D. M. Charney and G. M. Josin, "Neural network servo control of a robot manipulator joint in real-time," [Proceedings] 1991 IEEE International Joint Conference on Neural Networks, Singapore, 1991, pp. 1989-1994 vol.3.
14. H. Li, J. Li and X. Han, "Robot Vision Model Based on Multi-Neural Network Fusion," 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, pp. 2571-2577.
15. H. Li and J. Li, "Recognition of Robot Based on Attention Mechanism and Convolutional Neural Network," 2019 IEEE 3rd Information Technology, Networking, Electronic and Automation Control Conference (ITNEC), Chengdu, China, 2019, pp. 2578-2584.

Desarrollo de un módulo de construcción del modelo dinámico inverso para un manipulador robótico industrial

Hossian, Alejandro,[1]. Alveal, Maximiliano,[1]. Carabajal, Roberto,1. Echeverria, Cesar,1. Merlino, Hernan, 2.

[1]Universidad Tecnologica Nacional, Facultad Regional del Neuquen.

[2]Universidad Nacional de Lanus.

alejandrohossian@yahoo.com.ar

maximilianoalveal@hotmail.com

rcarabaj@copelnet.com.ar

checesarito@hotmail.com

1. Resumen

La mecánica analítica constituye una sólida herramienta matemática para formular modelos de sistemas mecánicos. El “Modelo Dinámico” de un manipulador robótico analiza la relación entre el movimiento producido en el robot y los pares/fuerzas aplicados en las articulaciones del mismo. Se presenta un proceso de construcción del modelo dinámico de un robot manipulador en base a la formulación de las ecuaciones de Lagrange, las cuales describen la dinámica de un robot manipulador mediante el balance de la energía cinética y potencial de sus eslabones). Con este modelo se analizan fenómenos físicos como: “Efectos Inerciales” – “Fuerzas Centrípetas y de Coriolis” – “Par Gravitacional” y “Fricción”. Este proceso posee como “insumos de entrada” los parámetros dinámicos (masas, longitudes y momentos de inercia de eslabones) y la matriz de transformación homogénea suministrada por modelo cinemático directo y como “productos de salida” las fuerzas y pares de torsión que se deben aplicar en cada articulación.

2. Introducción

El modelo dinámico [1] del robot manipulador permite explicar una gran variedad de fenómenos físicos presentes en la estructura mecánica del sistema – robot; tales como, fuerzas centrífugas y de Coriolis [2], efectos inerciales, par gravitacional y fenómenos de fricción (viscosa, Coulomb y estática). Estos fenómenos son intrínsecos de la naturaleza dinámica del robot [3]. En figura 1se ve la relación entre momentos de torsión τ, las variables articulares Θ y la trayectoria (T) que desarrolla el extremo del robot desde un punto A hasta el B.

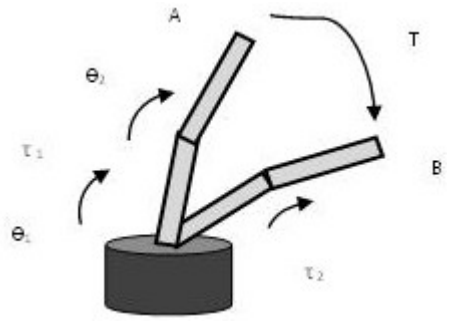


Figura 1. Relación entre los momentos de torsión τ, las variables articulares Θ y la trayectoria (T) que desarrolla el órgano terminal del robot desde un punto A hasta el B

El grupo de investigación en *“Robótica aplicada a la Ingeniería"* desarrolla un modelo de proceso de investigación en base a tres fases que procuran optimizar el diseño de un manipulador robótico industrial. La ***primera fase*** corresponde a la Cinemática del Robot, para la obtención de los Modelos Cinemático Directo e Inverso y del Modelo Diferencial de los manipuladores robóticos industriales; la ***segunda fase*** corresponde a la Dinámica del Robot, que se aplica a la obtención del Modelo Dinámico de estos brazos; y una ***tercera fase*** vinculada a los aspectos que hacen al Control del Robot, cuyos algoritmos permiten mejorar las características de velocidad y precisión. El

problema que se analiza en este artículo se encuadra dentro de la segunda fase del modelo de proceso de investigación, correspondiente a la Dinámica del Robot [5].

El modelo de proceso de investigación y desarrollo con sus tres fases (Cinemática del Robot, Dinámica del Robot y Control del Robot), se detalla en la figura 2.

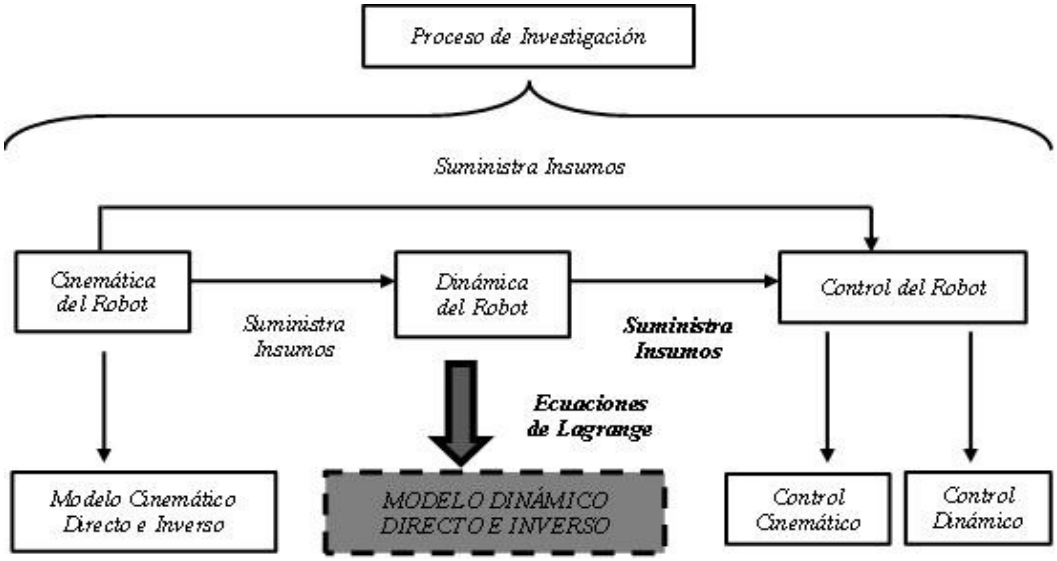


Figura 2. Modelo de Proceso de Investigación y Desarrollo

Se resalta el Modelo Dinámico Directo e Inverso y su vinculación con la fase de Dinámica del Robot; así como también, el suministro de insumos entre las diferentes fases del proceso. La fase de cinemática debe suministrar a la de dinámica las ecuaciones cinemáticas necesarias para desarrollar los balances de energía que exige la formulación Lagrangiana. Para obtener el modelo dinámico inverso es preciso contar con la forma adaptada de las ecuaciones de Lagrange; las cuales son suministradas desde la fase de dinámica del robot al módulo de construcción de los modelos dinámicos directo e inverso. Por su parte, la fase de cinemática del robot genera referencias a las fases de dinámica y control del robot [7]; y la fase de dinámica suministra insumos a la fase de control, para la realización del control dinámico [8].

En las siguientes sub – secciones siguientes se analizan los aspectos fundamentales del proceso de construcción.

2.1 Descripción global del Módulo de Construcción del Modelo Dinámico

El proceso de construcción del modelo dinámico del manipulador robótico se sustenta en la mecánica Lagrangiana. Los insumos de entrada que recibe este proceso; son los parámetros

dinámicos (masas, longitudes y momentos de inercia de eslabones), y los que suministra el módulo cinemático (la matriz de transformación homogénea con la información de las coordenadas cartesianas del extremo en función de las variables articulares ($^0p_n(t)$ en función de q(t)[3]), respecto al sistema de referencia asociado a la base del robot). El producto que se obtiene a la salida de este proceso, es un vector (τ) de fuerzas y momentos de torsión aplicados en los actuadores de las articulaciones para obtener determinadas trayectorias articulares (posición, velocidad y aceleración).

En figura 3 se ilustra se exhibe un esquema global con la entrada y la salida al módulo de construcción del modelo dinámico (directo e inverso) para la implementación del mencionado proceso. Cabe señalar, que se obtiene el vector τ en forma general conforme a la configuración del robot en cuestión, para luego hallar este vector τ para las trayectorias articulares en línea con las prestaciones que debe realizar el robot.

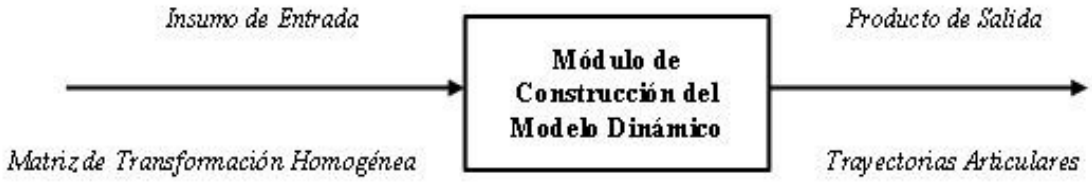


Figura 3. Insumos de Entrada y Producto de Salida al Módulo de Construcción del Modelo Dinámico

En las dos sub – secciones siguientes se analizan las características de las dos herramientas principales del proceso propuesto; considerando que ambas provienen de la mecánica analítica y se adaptan al análisis dinámico de un robot manipulador.

2.2 Aspectos fundamentales del Modelo Dinámico para un Robot Manipulador

La descripción matemática del modelo dinámico de un robot manipulador de n grados de libertad, está dada por la ecuación diferencial compleja y de naturaleza continua. Esta ecuación es multivariable con dinámica fuertemente acoplada y "no lineal" en el vector de estados $[q^T, \dot{q}^T]^T$; además de ser válida para un robot con una estructura en cadena cinemática abierta, que no incluye el fenómeno de elasticidad (1).

$$\tau(t) = M(q)\ddot{q} + C(q,\dot{q})\dot{q} + G(q) + F_f(\dot{q}, f_e) \qquad (1)$$

[3] Para la especificación de las trayectorias articulares, se usa en forma indistinta q(t) y Θ(t). De igual manera para sus derivadas.

Donde $\tau(t)$ es el vector de fuerzas o pares que se aplica a cada articulación, q ϵ R^n es el vector de posiciones articulares o coordenadas generalizadas[4], $\dot{q} \in R^n$ es el vector de velocidades articulares, $\ddot{q} \in R^n$ es el vector de aceleraciones articulares. A su vez, el modelo dinámico posee propiedades fundamentales para el estudio del control de robots manipuladores; las cuales están asociadas a cada uno de los términos.

I. *Efectos inerciales*: está representado por el producto entre la matriz de inercia y la aceleración articular $M(q)\ddot{q}$, y cuyo principal significado se manifiesta en el cambio de estado de movimiento del robot. A su vez, la matriz M $(q)^{nxn}$ (siendo n los grados de libertad del robot) es una matriz simétrica $M(q) = M(q)^T$, definida positiva M (q) > 0 y, por lo tanto, que admite inversa ($\exists M(q)^{-1}$).Los elementos de la matriz M dependen de las variables articulares y sus coeficientes son expresiones que incluyen las masas concentradas y las longitudes entre ellas.

II. *Fuerzas Centrípetas y de Coriolis*: $C(q,\dot{q}) \in R^{nxn}$ es la matriz de fuerzas centrípetas (fuerzas radiales en movimientos curvilíneos hacia adentro del centro de curvatura) y de Coriolis (esta fuerza representa la desviación del movimiento de traslación a raíz de su componente de rotación [9] y, al igual que la matriz M(q), también es vital en el estudio de la estabilidad del sistema de control del robot [10]), .A su vez, ($C(q,\dot{q})_{nxn}$) depende de q y $\dot{q}$ y no es única; pero el vector $C(q,\dot{q})_{nxn} \cdot \dot{q}_{nx1}$ si lo es. Las fuerzas centrípetas son radiales y se originan debido al movimiento de rotación; mientras que las fuerzas de Coriolis, se deben al movimiento relativo existente entre los distintos elementos que dependen de la configuración instantánea del manipulador, y siempre contienen el producto de dos velocidades de articulación distintas.

III. *Efecto gravitacional*: G(q) ϵ R^n es el vector de pares gravitacionales (vector gradiente de la energía potencial) y depende de las variables articulares q_i.

Efecto de fricción: el vector $F_f(\dot{q}, f_e) \in R^n$ es el vector de pares de fricción (viscosa, Coulomb y estática) de cada articulación del manipulador. Este fenómeno posee el efecto físico de oponerse al movimiento del robot. Un modelo clásico de fricción es el que combina la fricción viscosa y la de Coulomb, el cual depende de la velocidad de la variable articular y está dado por el vector $F_f(\dot{q}) = f_{m1}\dot{q} + f_{m2} sign(\dot{q})$. Donde f_{m1} y f_{m2} son matrices diagonales definidas positivas. Los elementos de la diagonal de f_{m1} son los parámetros de la fricción viscosa, y los de f_{m2} son los de la fricción de Coulomb. La fricción es un fenómeno disipativo (no conservativo) que se traduce en desgaste de las partes mecánicas del sistema; por lo es complejo modelar con exactitud estos términos.

2.3 Aspectos fundamentales de la Formulación Lagrangiana

Las ecuaciones de Lagrange permiten describir la dinámica de un manipulador mediante un balance de energía, la cual se expresa en términos de la energía cinética y potencial de sus eslabones. Para realizar la formulación Lagrangiana, es preciso contar con la cinemática directa del manipulador, lo que brinda la posibilidad de llevar a cabo cuatro procedimientos de cálculo: A)

[4] Para estas coordenadas se destaca que pueden variar cada una físicamente independientemente de la otra.

cálculo de la energía cinética ($K(q(t),\dot{q}(t))$),B) cálculo de la energía potencial ($U(q(t))$), C) cálculo del Lagrangiano ($L=K(q(t),\dot{q}(t))-U(q(t))$) y D) formulación de las ecuaciones escalares dinámicas de movimiento de Lagrange para un robot manipulador de n grados de libertad (gdl); las cuales se desarrollan para cada uno de ellos, donde el miembro $\tau - F_f(\dot{q}, f_e)$ se refiere a fuerzas o pares no conservativos en cada articulación (2).

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_i}\right]-\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_i}=\tau-F_f(\dot{q},f_e)\ i=1,2,\ldots n \tag{2}$$

2.4 Desarrollo del Módulo de Construcción del Modelo Dinámico

Como se detalló en la sub – sección 2.1, este módulo presenta como “insumos de entrada” los parámetros dinámicos (masas, longitudes y momentos de inercia de eslabones) la matriz de transformación homogénea suministrada por modelo cinemático directo. Por su parte, este proceso provee como “producto de salida” las fuerzas y pares de torsión que se deben aplicar en cada articulación, ajustados a las trayectorias articulares que se proponen. De acuerdo al esquema global de figura 3, en la figura 4 se exhibe el núcleo de aplicación del proceso; el cual se conforma de tres fases que permiten obtener las fuerzas y pares de torsión $\tau = \tau(q(t),\dot{q}(t),\ \ddot{q}\cdot\dot{\iota}(t))$. La 1ra fase desarrolla la “Formulación Lagrangiana” mediante los cuatro procedimientos citados en sub – sección 2.3. En la 2da fase se obtienen los pares de torsión en forma matricial; en otros términos, el modelo dinámico inverso general en función de la configuración del robot manipulador que se estudia. Para la realización de la 3ra fase se incorporan las trayectorias articulares $(q(t),\dot{q}(t),\ \ddot{q}\cdot\dot{\iota}(t))$. Se calculan los pares de torsión a aplicar en las articulaciones del robot para que el extremo del robot respete dichas trayectorias; una vez que se consideren los fenómenos de fricción u otras perturbaciones. Cabe señalar, que los resultados obtenidos constituyen importantes referencias hacia el módulo de control dinámico, siendo sustanciales en el diseño del sistema de control del robot.

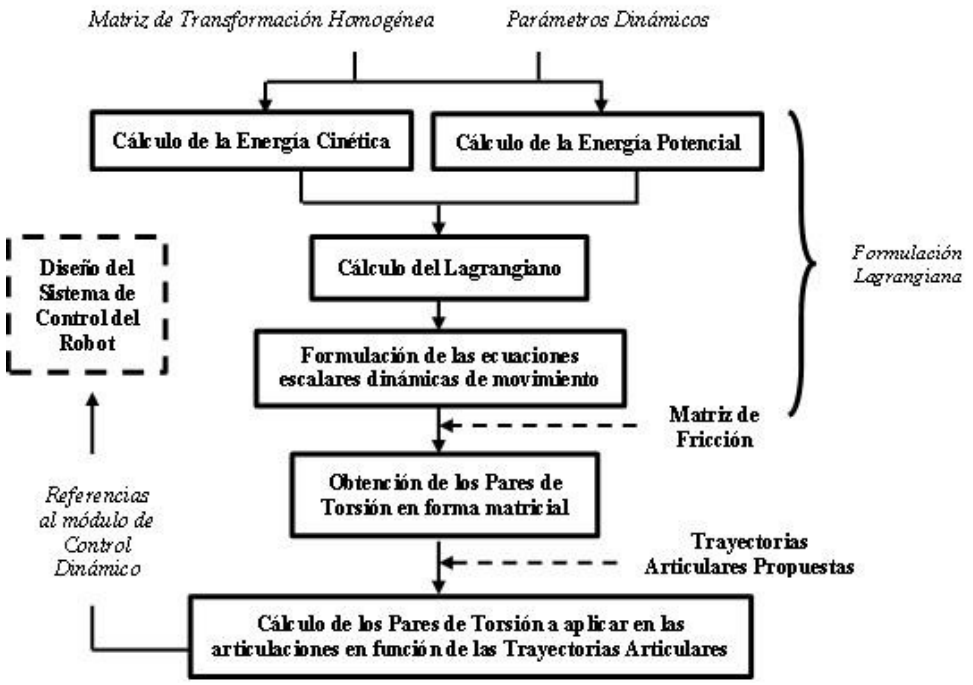


Figura 4. Núcleo y desarrollo del Proceso del Módulo de Construcción del Modelo Dinámico

3. Condiciones experimentales

En la figura 5 se ilustra un manipulador robótico de dos (gdl) con 2 articulaciones rotacionales (RR) y 2 eslabones rígidos, donde la muñeca se considera fija.

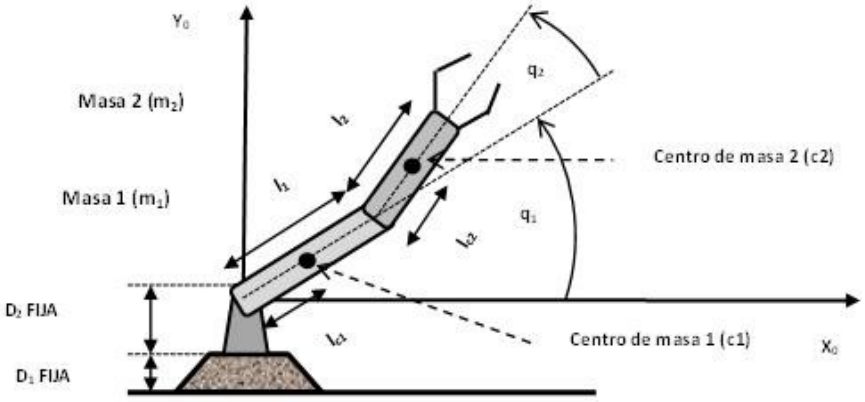


Figura 5. Manipulador Robótico Industrial de 2 Grados de Libertad

Insumos de entrada al proceso: 1) parámetros dinámicos: longitudes y masas de eslabones (l_1, l_2, m_1 y m_2), distancias entre los centros de masas (c_1 y c_2) y los ejes de giro (l_{c1} y l_{c2}) y los momentos de inercia de cada eslabón con respecto al eje que pasa por su centro de masa (J_1 y J_2). 2) matriz de transformación homogénea respecto a la base, la cual[5], la última columna indica las componentes (x, y) del vector posición del extremo del robot, respecto al sistema de referencia asociado a la base $S_0(X_0, Y_0)$.

$$ {}^{0}T_2 = \begin{bmatrix} c_{12} & -s_{12} & 0 & l_1 c_1 + l_2 c_{12} \\ s_{12} & c_{12} & 0 & l_1 s_1 + l_2 s_{12} \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} $$

Se inicia el Proceso del Módulo de Construcción del Modelo Dinámico, conforme a sus 3 fases para obtener las fuerzas y pares de torsión en las articulaciones del robot.

Fase 1: *Formulación Lagrangiana*: se desarrollan los 4 procedimientos.

Cálculo de la Energía Cinética ($K(q(t), \dot{q}(t))$): la energía cinética total del robot es la suma de la energía almacenada en cada eslabón ($K_{Total} = K_1 + K_2$). Para cada eslabón, la energía cinética total es la suma de traslación más la de rotación De la cinemática diferencial se obtiene las coordenadas y velocidades del CM de cada eslabón. Para el eslabón 1: $x_1 = l_{c1}C_1$ $y_1 = l_{c1}S_1$; luego es:

$$ v_1 = \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{y}_1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -l_{c1} S_1 \dot{q}_1 \\ l_{c1} C_1 \dot{q}_1 \end{bmatrix}; luego: v_1^T \cdot v_1 = \begin{bmatrix} -l_{c1} S_1 \dot{q}_1 & l_{c1} C_1 \dot{q}_1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} -l_{c1} S_1 \dot{q}_1 \\ l_{c1} C_1 \dot{q}_1 \end{bmatrix} = l_{c1}^2 \cdot \dot{q}_1^2 ; la\ energía\ cinética\ de $$

$$ traslación\ del\ eslabón 1\ es: K_{1T} = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \cdot \dot{q}_1^2 , y\ la\ de\ energía\ cinética\ de\ rotación\ es: K_{1R} = \frac{1}{2} J_1 \cdot \dot{q}_1^2 $$

La energía cinética total del eslabón 1 es igual a la suma de ambas contribuciones

$$ K_1(q, \dot{q}) = K_{1T} + K_{1R} = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \cdot \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \cdot \dot{q}_1^2 \qquad (3) $$

Análogamente, para el eslabón 2 es: $x_2 = l_1C_1 + l_{c2}\, C_{12}$, $y_2 = l_1S_1 + l_{c2}S_{12}$. Aquí se debe considerar que la energía cinética rotacional es la suma de las velocidades $(\dot{q}_1 + \dot{q}_2)$. La energía cinética total del eslabón 2 es la de traslación más la de rotación.

$$ K_2(q, \dot{q}) = K_{2T} + K_{2R} = \frac{1}{2} m_2 v_2^T v_2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 ; desarrollando\ esta\ \exp resión\ se\ tiene: $$

[5] Se abrevia cos (q_1) = C_1, cos (q_2) = C_2, cos ($q_1 + q_2$) = C_{12}, sen (q_1) = S_1 & sen ($q_1 + q_2$) = S_{12}

$$K_2(q,\dot{q}) = \frac{m_2}{2} l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2} l_{c2}^2 \left(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2 \right) + m_2 l_1 l_{c2} \left(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2 \right) C_2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \tag{4}$$

Para la energía cinética total se reemplaza 3) y 4) en $K_{Total} = K_1 + K_2$ obteniéndose:

$$K_{Total}(q,\dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2} l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2} l_{c2}^2 \left(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2 \right) + m_2 l_1 l_{c2} \left(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2 \right) C_2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 \tag{5}$$

Obtención de la Energía Potencial: la energía potencial total del robot es la suma de la energía almacenada en cada eslabón.

$$(U_{Total} = U_1 + U_2 = m_1 g l_{c1} S_1 + m_2 g (l_1 S_1 + l_{c2} S_{12}) \tag{6}$$

Obtención del Lagrangiano: para esto se calcula la diferencia entre la energía cinética total y la energía potencial gravitatoria total. $L = K_{Total}(q(t), \dot{q}(t)) - U_{Total}(q(t))$

Luego, sustituyendo 5) – 6) en la expresión anterior se obtiene (7):

$$L(q,\dot{q}) = \frac{1}{2} m_1 l_{c1}^2 \dot{q}_1^2 + \frac{1}{2} J_1 \dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2} l_1^2 \dot{q}_1^2 + \frac{m_2}{2} l_{c2}^2 \left(\dot{q}_1^2 + 2\dot{q}_1\dot{q}_2 + \dot{q}_2^2 \right) + m_2 l_1 l_{c2} \left(\dot{q}_1^2 + \dot{q}_1\dot{q}_2 \right) C_2 + \frac{1}{2} J_2 (\dot{q}_1 + \dot{q}_2)^2 - m_1 g l_{c1} S_1 - m_2 g (l_1 S_1 + l_{c2} S_{12}) \tag{7}$$

Formulación de las ecuaciones de Lagrange: de la ecuación 2) para cada coordenada generalizada q_1 y q_2)[6], se tienen las expresiones (8), (9), (10) y (11): derivando L respecto a la posición y velocidad articular de cada coordenada.

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_1} \right] = \left[m_1 l_{c1}^2 + J_1 + J_2 + m_2 \left(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2 \right) \right] \ddot{q}_1 - \left[m_2 l_{c2} (l_1 C_2 + l_{c2}) + J_2 \right] \ddot{q}_2 - \left[2 m_2 l_1 l_{c2} S_2 \right] \dot{q}_1 \dot{q}_2 - \left[m_2 l_1 l_{c2} S_2 \right] \dot{q}_2^2 \tag{8}$$

$$\frac{d}{dt}\left[\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial \dot{q}_2} \right] = \left[m_2 l_{c2}^2 + J_2 \right] \ddot{q}_2 + \left[m_2 l_{c2} (l_1 C_2 + l_{c2}) + J_2 \right] \ddot{q}_1 - \left[m_2 l_1 l_{c2} S_2 \right] \dot{q}_1 \dot{q}_2 \tag{9}$$

[6] Se omite para este análisis los fenómenos de fricción (viscosa, Coulomb y estática) de cada articulación.

$$\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_1} = -g\left[\left(m_1 l_{c1} + m_2 l_1\right) C_1 + m_2 l_{c2} C_{12}\right] \tag{10}$$

$$\frac{\partial L(q,\dot{q})}{\partial q_2} = -\left[m_2 l_1 l_{c2} S_2\right]\dot{q}_1^2 - \left[m_2 l_1 l_{c2} S_2\right]\dot{q}_1\dot{q}_2 - g m_2 l_{c2} C_{12} \tag{11}$$

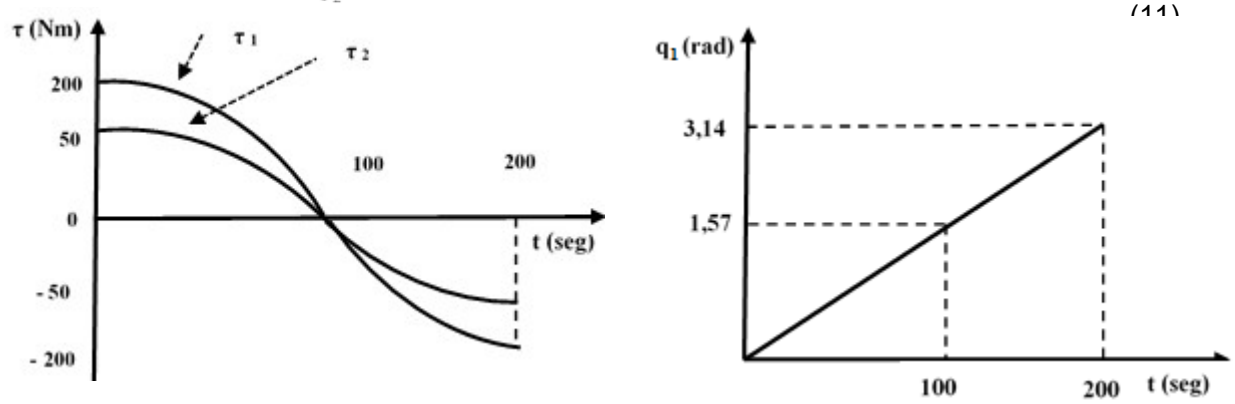


Figura 6. a) Evolucion temporal de los pares de torsión τ_1 y τ_2 correspondientes al caso 1.

b) Evolucion temporal de las variables articulares correspondientes al caso 1

Fase 2: *Obtención de los pares de torsión en forma matricial*: se aplica la ecuación 2) para las coordenadas articulares 1 y 2; operando con las ecuaciones (8), (9), (10) y (11) de la forma: $\tau_1 = (8) - (10) \wedge \tau_2 = (9) - (11)$, se obtiene la expresión (12). Por simplicidad de se omiten J_1 y J_2. Luego, si se efectúa el producto matricial en (12); y se expresa cada par de torsión por separado, se arriba a las expresiones (13) y (14):

$$\begin{bmatrix}\tau_1\\ \tau_2\end{bmatrix} = \begin{bmatrix} m_1 l_{c1}^2 + m_2\left(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2\right) & m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right) \\ m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right) & \left(m_2 l_{c2}^2\right)\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\ddot{q}_1\\ \ddot{q}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} -2 m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{q}_2 & -m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{q}_2 \\ m_2 l_1 l_{c2} S_2 \dot{q}_1 & 0\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\dot{q}_1\\ \dot{q}_2\end{bmatrix} + \begin{bmatrix} g\left[\left(m_1 l_{c1} C_1 + m_2\left(l_1 C_1 + l_{c2} C_{12}\right)\right)\right] \\ g m_2 l_{c2} C_{12}\end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\tau_1 = \left[m_1 l_{c1}^2 + m_2\left(l_1^2 + l_{c2}^2 + 2 l_1 l_{c2} C_2\right)\right]\ddot{q}_1 + \left[m_2 l_{c2}\left(l_1 C_2 + l_{c2}\right)\right]\ddot{q}_2 - \left(2 m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_1\dot{q}_2 - \left(m_2 l_1 l_{c2} S_2\right)\dot{q}_2^2 + g\left[\left(m_1 l_{c1} C_1 + m_2\left(l_1 C_1 + l_{c2} C_{12}\right)\right)\right] \tag{13}$$

$$\tau_2 = \left[m_2 l_{c2} \left(l_1 C_2 + l_{c2} \right) \right] \ddot{q}_1 + \left(m_2 l_{c2}^2 \right) \ddot{q}_2 + \left(m_2 l_1 l_{c2} S_2 \right) \dot{q}_1^2 + g m_2 l_{c2} C_{12} \quad (14)$$

Fase 3: *Cálculo de los pares de torsión a aplicar en las articulaciones de acuerdo a las Trayectorias Articulares*: en esta fase, se disponen de ciertas trayectorias articulares, como: $(q(t), \dot{q}(t), \ddot{q}(t))$, y se calculan los pares de torsión en cada articulación del robot, para que el órgano terminal desarrolle estas trayectorias. Se plantean 2 casos experimentales cuyos parámetros dinámicos se corresponden con los de la figura 5: $m_1 = m_2 = 10kg$, $l_1 = l_2 = 1m$, $l_{c1} = l_{c2} = 0{,}5m$, $g = 10m/seg^2$ (no se consideran J_1 y J_2). En ambos casos se adopta un lapso de tiempo de 0 a 200 seg.

Caso 1: durante los 200 seg la variable articular q_1 desarrolla velocidad constante de 0,0157rad/seg y $q_2 = 0$. Es decir, q_1 varía de 0 a 180º en los 200 seg y el brazo completo del manipulador permanece estirado. Se tienen las siguientes expresiones para las variables articulares:

$q_1(t) = 0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg} * t$, $\dot{q}_1(t) = 0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg}$ y $\ddot{q}_1 = \ddot{q}_2 = \dot{q}_2 = q_2 = 0$

Sustituyendo estos valores y los parámetros dinámicos en (13) y (14), se tienen las (15) y (16) para los pares de torsión, cuya representación se ve en la figura (6b):

$$\tau_1 = 200 \, {}^{N}/_{m} * \cos\left(0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg} * t\right) \quad (15)$$

$$\tau_2 = 50 \, {}^{N}/_{m} * \cos\left(0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg} * t\right) \quad (16)$$

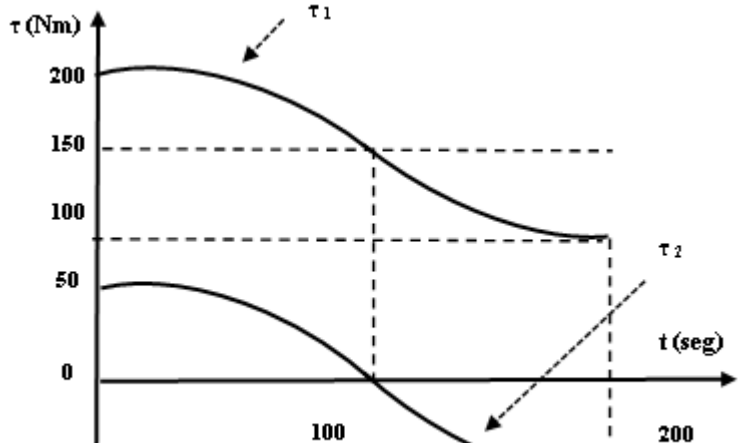
Caso 2: durante los 200 seg la variable articular q_2 desarrolla velocidad constante de 0,0157rad/seg y $q_1 = 0$. Es decir, q_2 varía de 0 a 180º en los 200 seg y el eslabón 1 permanece estirado. Se tienen las siguientes expresiones para las variables articulares:

$q_2(t) = 0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg} * t$ (figura (7a)), $\dot{q}_2(t) = 0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg}$ y $\ddot{q}_1 = \dot{q}_1 = q_1 = 0$

Sustituyendo estos valores y los parámetros dinámicos en (13) y (14), se tienen las (17) y (18) para los pares de torsión, cuya representación se ve en la figura (7b):

$$\tau_1 = 150Nm + 50 \, {}^{N}/_{m} * \cos\left(0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg} * t\right) - 0{,}00123Nm * sen\left(0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg} * t\right) \quad (17)$$

$$\tau_2 = 50 \, {}^{N}/_{m} * \cos\left(0{,}0157 \, {}^{rad}/_{seg} * t\right) \quad (18)$$



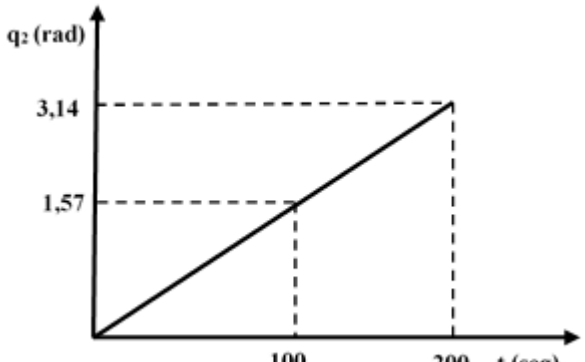


Figura 6. a) Evolucion temporal de los pares de torsión τ_1 y τ_2 correspondientes al caso 2.

b) Evolucion temporal de las variables articulares correspondientes al caso 2.

4. Resultados y discusión

Se discuten los resultados de los casos 1 y 2 para esas variables articulares.

Caso 1: las ecuaciones 15 y 16 indican que los pares de torsión que los actuadores proveen en ambas articulaciones deben contrarrestar el efecto gravitatorio de ambos eslabones (solo quedan términos en cos q_1). El efecto mecánico es que no contribuyen los efectos inerciales (las dos aceleraciones articulares son nulas), ni el término de Coriolis (una velocidad articular es nula), ni los términos de las fuerzas centrípetas (el brazo 2 está siempre estirado, $q_2 = 0$ y es nula la velocidad articular 2). Un breve análisis de la situación física real, en sintonía con el gráfico de figura 6a indica que: en t = 0seg es $q_1 = q_2 = 0º$ (ambos brazos estirados en forma horizontal, figura 8a), $\tau_1 =$ 200Nm y $\tau_2 = 50$Nm (requiriendo ambas articulaciones par de torsión máximo en este instante). En t = 100seg es $q_1 = q_2 = 90º$ ($\pi/2$) (ambos brazos estirados en forma vertical, figura 8b), $\tau_1 = \tau_2 = 0$Nm (en este instante el par de torsión es nulo en ambas articulaciones. Si continúan aumentando las variables articulares pasados los 90º hasta los 180º en t = 200seg, ambos pares vuelven a crecer en su valor pero con signo contrario. Esto se debe a que ambos brazos tienden a caer por efecto gravitatorio; y debe graduar esa "caída" mediante los pares aplicados en las articulaciones para que el manipulador "baje" conforme a la trayectoria propuesta. Es decir, en t = 200seg es $q_1 = q_2 = 180º$ (π) (ambos brazos estirados en forma horizontal, figura 10), $\tau_1 = -200$Nm y $\tau_2 = -50$Nm (requiriendo ambas articulaciones par máximo en este instante). Ver figura 8c.

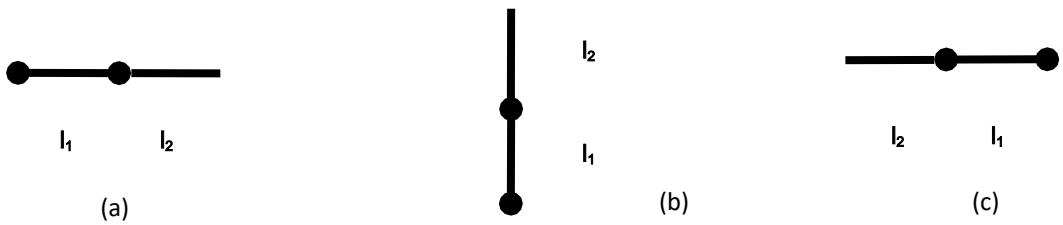


Figura 8. Posiciones del Manipulador q_1 = 0,0157rad/seg.t y q_2 = 0º y para t = 0, 100 y 200 seg

Caso 2: según las ecuaciones 17 y 18, y similar al caso 1, ambos pares de torsión deben contrarrestar el efecto gravitatorio de ambos eslabones; con la salvedad que existe el término de la fuerza centrípeta de m_2 sobre la articulación 1 (aunque se puede despreciar frente a los otros valores). También se anula el término de Coriolis por las mismas razones; y como $q_1 = 0$, hay un término independiente de 150Nm en la ecuación 17 para τ_1. Este hecho modifica sustancialmente la situación con respecto al caso 1, dado que no se anula el par τ_1 en ningún instante. Un breve análisis de la situación física real, en sintonía con el gráfico de figura 7a indica que: en t = 0seg es $q_1 = q_2 = 0º$ (ambos brazos estirados en forma horizontal, figura 9a), τ_1 = 200Nm y τ_2 = 50Nm (requiriendo ambas articulaciones pares de torsión máximo en este instante). Es decir que para este instante la situación es igual al caso anterior. En t = 100seg es $q_1 = 0º$ y $q_2 = 90º$ ($\pi/2$) (situación que se ilustra en la figura 9b); aquí τ_1 = 150Nm y τ_2 = 0Nm. En este instante la articulación 1 requiere un par de 100Nm ejercido por el peso del eslabón 2 en posición vertical (se redujo en 50Nm con respecto al caso anterior porque se acortó el brazo de palanca en 0,5m con respecto a cuándo éste está estirado), más el otro par de 50Nm proveniente del peso del eslabón 1. Si el eslabón 2 continúa girando respecto a la vertical y la variable articula supera los 90º hasta llegar a los 180º en t = 200seg, permaneciendo siempre el eslabón 1 en posición horizontal, será $q_1 = 0º$, $q_2 = 180º$ (π) (el brazo 2 doblado sobre el 1 en forma horizontal, figura 9c), τ_1 = 100Nm (valor mínimo que adopta el par τ_1 sobre la articulación 1) y τ_2 = -50Nm. Desde el punto de vista físico, el valor del par τ_1 se compone de 50 Nm que aporta el peso del eslabón 1, el cual siempre par de torsión a la articulación 1 porque permanece en posición horizontal los 200 segundos), más los otros 50 Nm que aporta el eslabón 2 (también en posición horizontal para este instante de 200 segundos). El par sobre la articulación 2, vale τ_2 = -50Nm, dado que al invertirse la posición del eslabón 2 (como se ve en figura 9c), el par de torsión mantiene su valor pero ahora la articulación 2 debe reaccionar con un par en sentido contrario (antihorario) al primer caso en donde $q_2 = 0$.

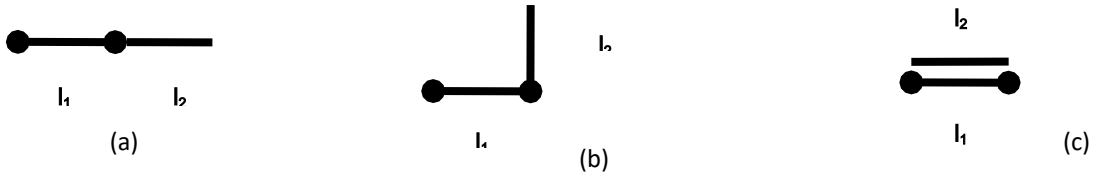


Figura 9. Posiciones del Manipulador q_1 = 0º y q_2 = 0,0157rad/seg.t y para t = 0, 100 y 200 seg

5. Conclusiones y futuras líneas de investigación

Se extraen las siguientes conclusiones de esta propuesta: 1) el problema analizado se encuadra en el modelo de proceso de investigación y desarrollo, 2) se desarrolla un proceso de construcción del modelo dinámico de un manipulador en base a la formulación Lagrangiana en base a tres fases que se desarrollan en forma interconectada, 3) este proceso se nutre con la matriz de transformación homogénea y los parámetros dinámicos del robot, y proporciona como salida las fuerzas y pares de torsión que se deben aplicar en cada articulación, de acuerdo a las trayectorias articulares que se proponen. 4) se describe un caso de estudio de un manipulador de 2 gdl y se analizan en detalle los resultados de 2 casos experimentales.

Se desarrollan las siguientes líneas de investigación: I) probar el modelo analítico obtenido en banco experimental donde los eslabones y sistemas de trasmisión se construyen en nuestro laboratorio. II) diseño y evaluación del sistema de control dinámico del robot utilizando los pares de torsión obtenidos como entrada al sistema. III) probar trayectorias articulares más complejas. IV) introducir fricciones viscosas en las articulaciones y medir la respuesta del sistema en condiciones similares.

6. Bibliografía

1. Reyes Cortes, F.: Control de robots manipuladores. (2011).
2. Barrientos, A., Pañin, L. F., Balaguer, C., Araci, R: Fundamentos de robotica. 2da edn. McGrawHill, España (2007).
3. Santos, J.: Evolucion artificial y robotica autónoma. 2da edn., RA-MA, España (2004).
4. Frey, C. y Osborne, M. Technology at Work v2.0: The Future Is Not What It Used to Be. University of Oxford. 2016.
5. Hossian, A., Olivera, V., Cejas, L.: Analisis de conductas de vehiculos roboticos en entornos estructurados mediante la aplicacion de tecnologías inteligentes.18 Convencion científica de ingeniería y arquitectura. La Habana, Cuba. 2016
6. Hossian, A., Olivera, V., Cejas, L., Sapag, L.: Estudio del comportamiento de robots móviles autónomos en entornos de navegación estructurados mediante la aplicación de tecnologías inteligentes.12 Congreso interamericano de computación aplicada a la industria de procesos. Lima, Peru. 2016

7. Arntz, M., Gregory, T. y Zierahn, U. “The Risk of Automation for Jobs in OECD Coutries: A Comparative Analysis”. OECD Social, Employment and Migration WorkingPapers No.189. París: OECD Publishing. 2016.
8. Bartlett, J. The Dark Net. Inside the Digital Underworld. Nueva York: Melville House. 2015
9. Colvin, K. F., Champaign, J., Liu, A. et al. 2014. “Learning in an Introductory Physics MOOC: All Cohorts Learn Equally, Including an On-Campus Class”. The International Review of Research in Open and Distance Learning. 15 (4): 263-283.
10 Brynjolfsson, E. y McAfee, A. 2014. The Second Machine Age. Nueva York y Londres: Norton & Company.

Sistema de comunicación basado en radio definido por software para un robot modular

Gómez, Helmunt A.[1], Porras, Nicolas[1], Pedraza, Luis[1].

[1]Universidad Distrital Francisco José de Caldas

hagomezp@correo.udistrital.edu.co, nporrasg@correo.udistrital.edu.co, lfpedrazam@udistrital.edu.co

1. Resumen

Este proyecto presenta el desarrollo de un sistema de comunicación controlado desde una Raspberry pi 3 para enviar instrucciones de movimiento a un robot modular. El sistema de comunicación usa tecnología WiFi (IEEE 802.11b, g, n) con base en el principio de la radio definida por software (SDR) para transmitir sobre el canal con mayor relación señal a ruido (SNR) disponible. El sistema también permite que el robot envíe la información de la velocidad promedio angular hacia la nube y dicha información se aloje en un servidor. Los resultados muestran el correcto funcionamiento del sistema de comunicación implementado.

2. Introducción

Los sistemas de comunicación han evolucionado a través de los años con el fin de ser más eficaces en la transmisión de la información, por tanto, han surgido avances en los tipos de modulación, los medios de transmisión, etc [1]. Uno de los enfoques novedosos de los sistemas de comunicación corresponde al desarrollo de la tecnología de SDR, que es un sistema de radio en donde los componentes se implementan utilizando software para interactuar con el hardware [2]. También, se ha indicado que la SDR es una de las tecnologías que abarca el Internet de las Cosas (IoT) [3], por esto se ha utilizado en diferentes esquemas de redes como en los recientes estándares

IEEE 802.11p e IEEE 802.11ah [4,5]. Además, en [6] se han analizado diferentes dispositivos de SDR de bajo costo, evaluando parámetros como la potencia de salida, el ancho de banda y la frecuencia de muestreo.

En este proyecto se usa el dispositivo Raspberry Pi 3 para implementar el SDR, puesto que es un dispositivo en el que es posible desarrollar aplicaciones inalámbricas con un robusto sistema embebido de bajo costo. En diversas aplicaciones se hace uso de la comunicación inalámbrica con Raspberry, p. ej., en [7] se utiliza la Rapberry Pi 3 como un servidor que es capaz de transferir archivos a varios computadores utilizando WiFi mediante el software Samba. En [8-12] se realizan controles y monitoreo de diferentes variables para sistemas de riego. Para el control de robots en [13] se utiliza como sistema de comunicación el protocolo 802.11g con el que se monitorea y almacena datos en tiempo real, y en [14] se programa un control para un robot en Python que genera movimientos básicos y envía video a un dispositivo Android.

En este trabajo se desarrolla una propuesta novedosa en la que se envía información para el movimiento de un robot modular [15] a través de un dispositivo de SDR implementado en la Raspberry Pi 3 que evalúa la mejor relación señal a ruido (SNR) de los canales WiFi, adicionalmente el robot envía el dato de la velocidad angular promedio hacia la nube. Este artículo se encuentra organizado de la siguiente manera: En la sección 3 se presenta una descripción detallada del sistema de comunicación. En la sección 4 se exhiben los principales resultados alcanzados. Y finalmente, en la sección 5, se muestran las conclusiones obtenidas.

3. Esquema del sistema de comunicación

El sistema de comunicaciones desarrollado, el cual se observa en la Figura 1, está compuesto: primero, por una Raspberry Pi 3, que se configura como Punto de Acceso Inalámbrico (WAP) y en la que se desarrolla el SDR, segundo, por un router que brinda conexión a internet y envía la información generada desde el robot hacia la nube, también se conecta con un PC donde existe un software que analiza la red para medir el nivel de potencia de los canales de las redes WiFi. En este PC también se genera la secuencia de movimientos que se envía al robot; tercero, por un microcontrolador ESP32 que se comunica bidireccionalmente con la Raspberry, transmitiendo la secuencia de movimientos al robot y la información de la velocidad angular del robot hacia la Raspberry para ser enviada y almacenada en la nube.

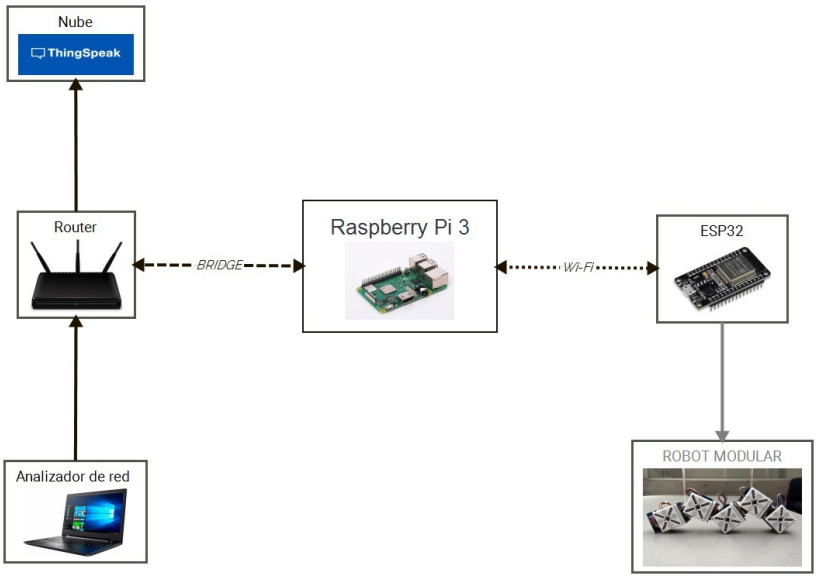


Figura 1. Diagrama de bloques del sistema de comunicación

3.1. Configuración del Punto de Acceso Inalámbrico en la Raspberry Pi 3

La Raspberry Pi 3 tiene una tarjeta de red incorporada, para su configuración se utilizan los paquetes de software *hostapd* y *dnsmasq*. El paquete *hostapd* permite la configuración del WAP, como por ejemplo, el nombre de la red inalámbrica (SSID), el canal, el nivel de seguridad, entre otros. Por su parte, *dnsmasq* brinda utilidades para la configuración de un servidor del Protocolo de Configuración Dinámica de Host (DHCP) y del Sistema de Nombres de Dominio (DNS).

Para brindar acceso a internet del WAP, es necesario realizar un *brigde* (puente) entre la interfaz inalámbrica de la Raspberry y el adaptador de red Ethernet, de esta forma todo el tráfico se redireccionará a través del cable de red que se conecta a un router para acceder a internet.

3.2 Medición de potencia de los canales WiFi

En la Raspberry Pi se tiene limitaciones en la interfaz de red, ya que al realizar la configuración del *brigde* para la conexión a internet se inhabilitan las funciones inalámbricas del dispositivo. Por esta razón se utiliza un software llamado *WifiInfoView* [16] instalado en el PC para medir la potencia de los canales WiFi de las redes inalámbricas circundantes. Luego de medir la potencia de los canales en la banda de 2.4 GHz, se envía esta información a la Raspberry Pi para poner en funcionamiento el SDR.

3.3 Desarrollo de la aplicación de SDR

El sistema de SDR desarrollado establece la transmisión WiFi entre la Raspberry y el ESP32, desde el comienzo, utilizando el canal que tiene mayor SNR. Para lograr lo anterior se realiza lo siguiente. Primero se toman las potencias o indicadores de fuerza de la señal recibida (RSSI) de los canales de los puntos de acceso que se encuentran en el entorno de la Raspberry, los cuales son medidos por el software *WifiInfoView*. Luego se promedia la potencia por canal a partir de las mediciones de RSSI de los puntos de acceso, como se muestra en la ecuación 1.

$$\overline{P}_{channel}[dBm] = \frac{\sum_{i=1}^{N} P_{channel}}{N} \tag{1}$$

Donde $\overline{P}_{channel}$es la potencia promedio del canal WiFi en dBm, $P_{channel}$ es la potencia del canal para un punto de acceso inalámbrico en dBm y *N* es el número de puntos de acceso inalámbricos que están presentes para el mismo canal.

Ahora se procede con el cálculo de la potencia de ruido blanco gaussiano ($P_{white_{noise}}$):

$$P_{white_{noise}}[dBm] = 10\log\left(kTB\right) \tag{2}$$

Donde k es la constante de Boltzmann 1.3806852×10^{-23} J/K, *T* es la temperatura ambiente en grados Kelvin, para este caso es 298.15 ºK y *B* es el ancho de banda de cada canal WiFi en Hz que es 20 MHz. Por tanto, la $P_{white_{noise}}$ es -131 dBm.

Finalmente, la SNR de cada canal se encuentra con la ecuación 3 [17].

$$SNR[dB] = \overline{P}_{channel}[dBm] - P_{white_{noise}}[dBm] \tag{3}$$

En el diagrama de flujo de la Figura 2 se presenta la secuencia usada para ejecutar la aplicación de SDR desarrollada en la Raspberry. En primera instancia abre el archivo proveniente de la aplicación *WifiInfoView*, luego realiza la transferencia de archivos entre plataformas (PC – Raspberry) mediante el protocolo SMB/CIFS, después compara las SNR obtenidas por cada canal medido en el entorno (usando la ecuación 3), posteriormente, se elige el canal donde hay mayor SNR y finalmente, se configura este canal elegido en el punto de acceso.

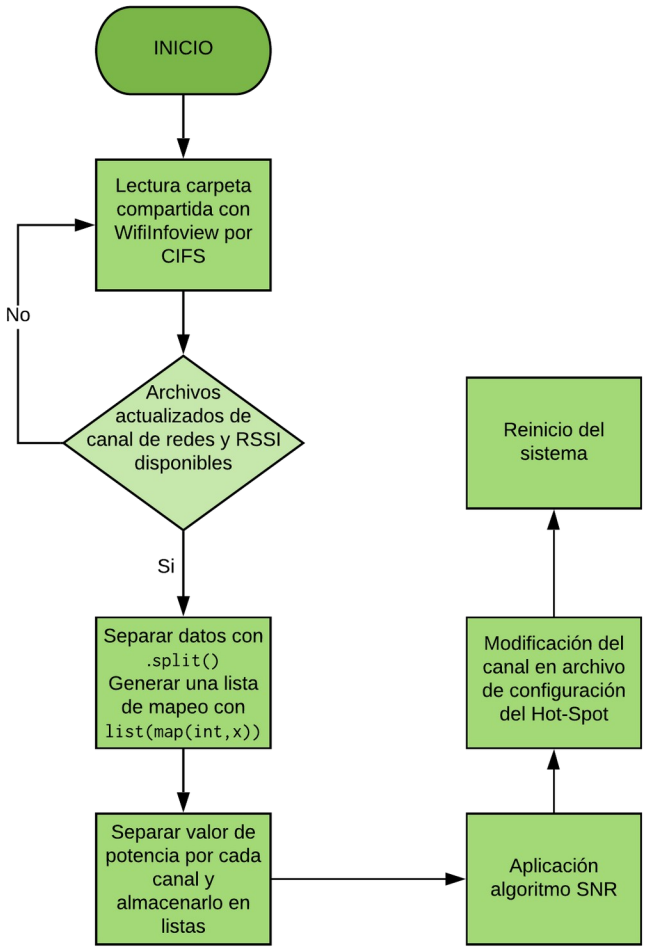


Figura 2. Diagrama de flujo del algoritmo de SDR

3.4 Comunicación entre la Raspberry Pi y el ESP32

La comunicación entre estos dos dispositivos es bidireccional. Aquí la Raspberry le envía al ESP32, ubicado en el robot modular, la secuencia de movimientos; y el ESP32 le envía a la Raspberry la velocidad angular promedio del robot. Para esto se usó el protocolo UDP (Protocolo de Datagramas de Usuario).

La rutina programada en la Raspberry Pi, se desarrolló en Python, la cual direcciona los paquetes de la secuencia de movimiento del robot a la dirección IP del ESP32, habilita el buffer de entrada para recibir paquetes provenientes del ESP32, y ejecuta un sub-proceso para realizar la conexión a los servidores de *ThingSpeak* y así enviar a la nube el parámetro de desempeño del robot, que para este caso es la velocidad angular promedio de cada movimiento.

El algoritmo de programación contenido en el ESP32 fue desarrollado en Arduino IDE. Este contiene las instrucciones necesarias para interpretar los comandos enviados desde la Raspberry Pi para mover el robot, también, recopila y envía los datos obtenidos por el robot conectándose al WAP de la Raspberry.

3.5 Conexión a la nube

Para realizar la conexión al servidor de *ThingSpeak*, se ejecuta un script como sub-proceso dentro de la rutina principal de comunicación UDP en la Raspberry. En la Figura 3, se muestra el proceso desarrollado en el sistema de comunicación para alojar los datos en el servidor. Mediante la clave y la identificación (ID) proporcionados por la plataforma, se accede al canal previamente creado. Posteriormente, tras lograr la transmisión de datos entre WAP y el microcontrolador, se habilita la rutina que envía el parámetro de desempeño al servidor para ser visualizado, tras un retardo de alrededor de un minuto.

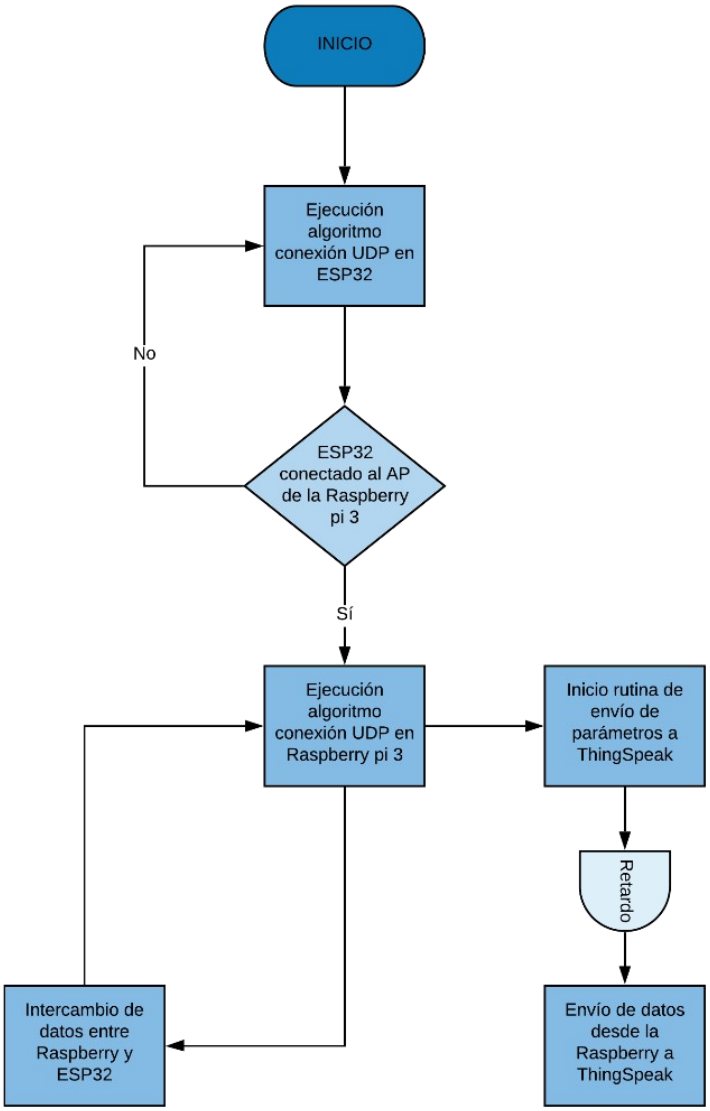


Figura 3. Diagrama de conexión a la nube

4. Resultados

En la Figura 4 se presentan los elementos que componen el sistema de comunicación: el router, la Raspberry Pi 3 y el PC para el escaneo de la potencia de los canales de las redes. También se observa el robot modular EMeRGE.

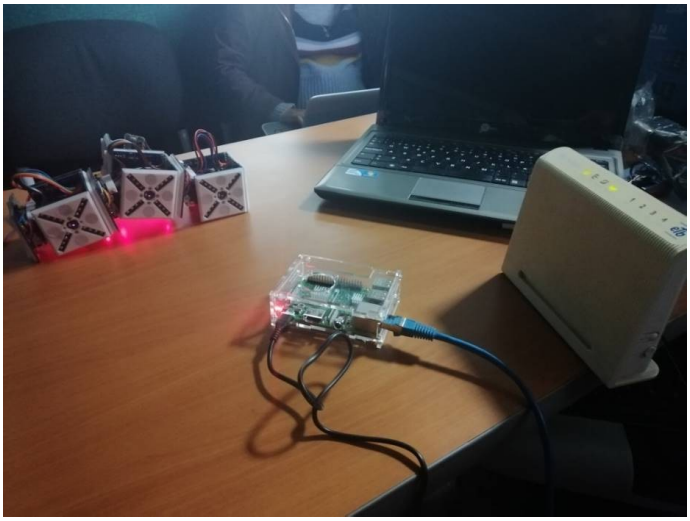


Figura 4. Elementos del sistema de comunicación y robot modular.

4.1 Transmisión de datos

Inicialmente se verifica la conexión a internet por parte de la Raspberry, luego se ejecuta el script programado que posibilita la comunicación UDP entre la Raspberry y el ESP32, y también se inicia el sub-proceso para el envío de datos a la nube (*ThingSpeak*). En la Figura 5 se muestra la consola de ejecución del algoritmo UDP en la Raspberry, el programa ejecuta líneas en la terminal cada vez que envía exitosamente secuencias de movimiento al ESP32 para el robot. En este caso, el ESP32 toma el rol de cliente con una dirección IP 10.28.1.192 y el puerto 1234, desde la Raspberry se envía la secuencia de movimiento del robot (A0512#B0512#...) y, además, se recibe desde el ESP32 el mensaje de confirmación 'ArduinoToRasp' en la Raspberry.

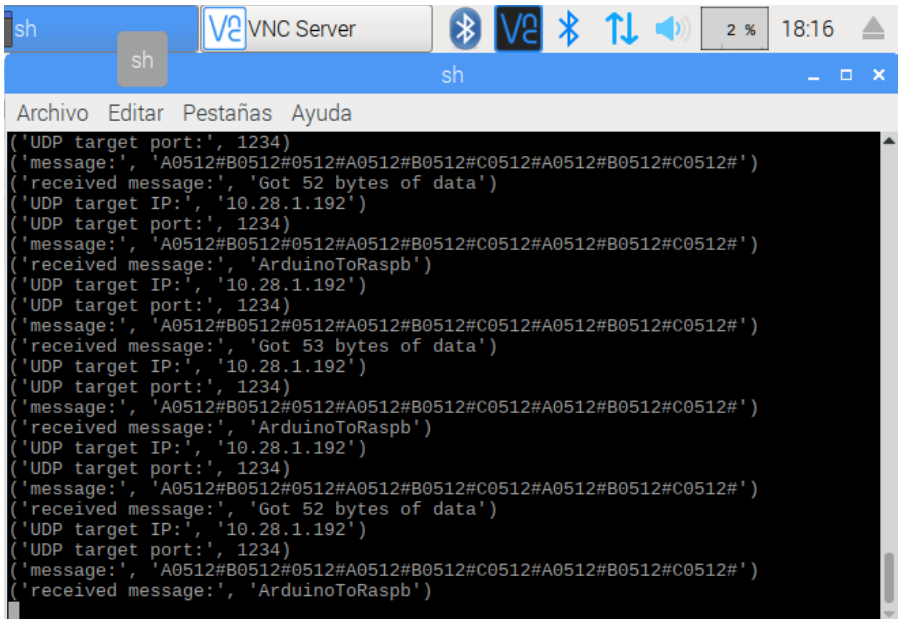


Figura 5. Ejecución del algoritmo UDP en la Raspberry.

En la rutina principal del ESP32 se pueden observar los datos recibidos desde la Raspberry. Al abrir el puerto serie en Arduino se muestra la información relacionada con el protocolo UDP y la red configurada, tal como se exhibe en la Figura 6. Aquí aparece que el canal es el “1”, la dirección IP desde donde se transmite la información es la 10.28.1.174, la dirección IP del dispositivo de destino es la 10.28.1.192 y la longitud de la cadena de datos.

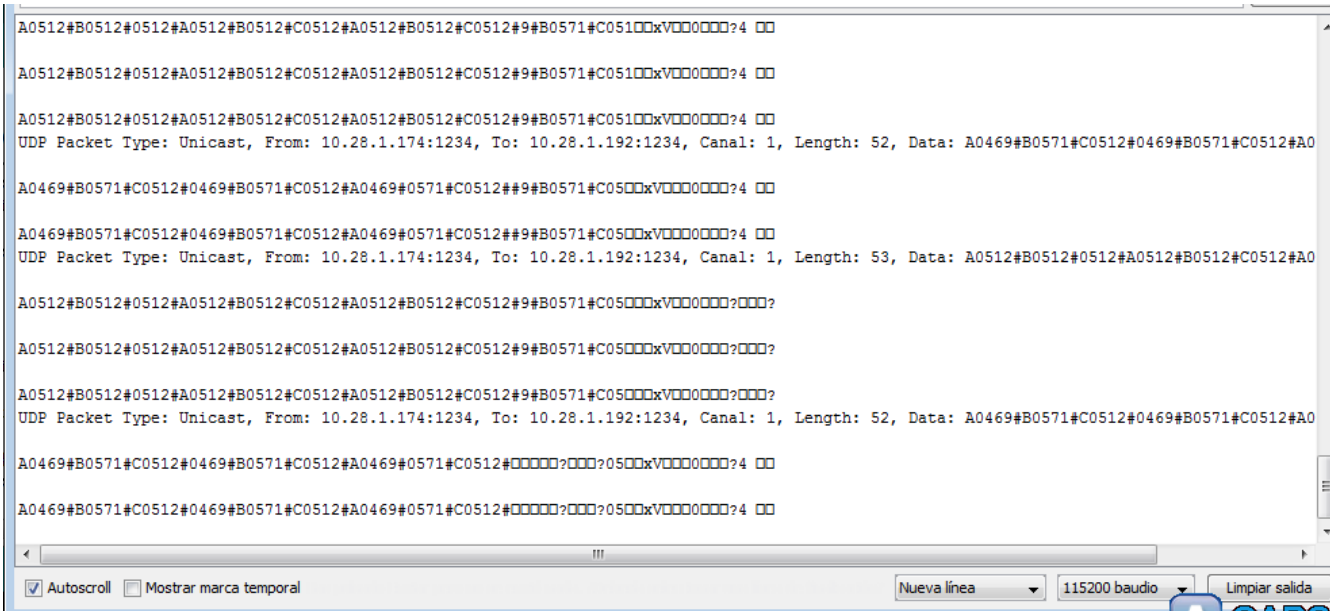


FIGURA 6. EJECUCIÓN DEL ALGORITMO EN EL ESP32.

Los paquetes que se transmiten entre la Raspberry, el router y el microcontrolador se pueden visualizar usando un analizador de protocolos como lo es *Wireshark* que captura los datos que están presente en la red, como las direcciones de fuente, de destino y el protocolo utilizado. La Figura 7 muestra la captura de datos en el WAP donde se observa la comunicación con el router. En la Figura 8 se observa la comunicación entre el ESP32 (identificado como Espressi_b5:40:e0 que es la dirección Ethernet) y la Raspberry.

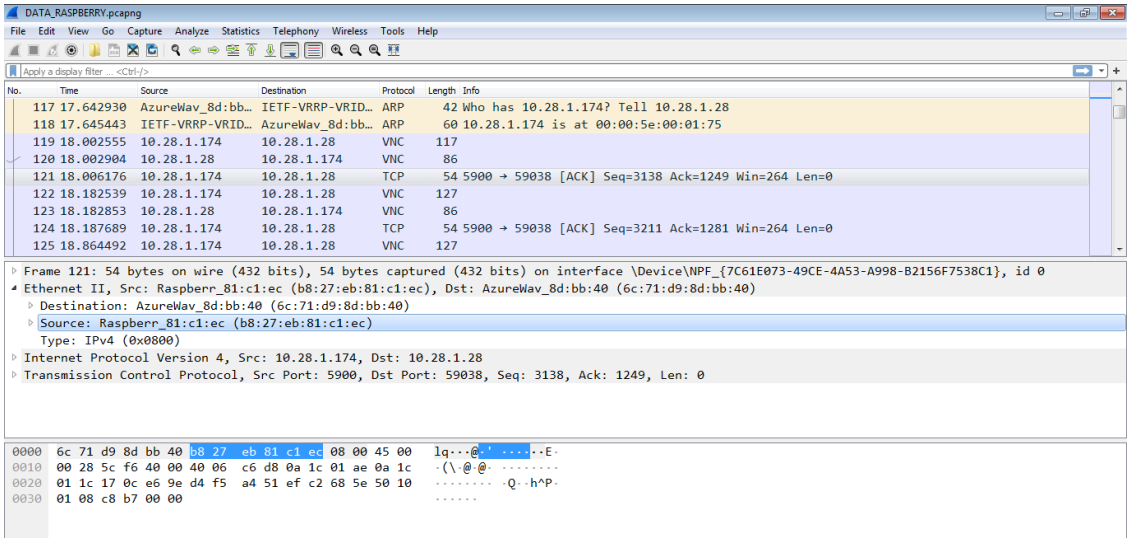


FIGURA 7. DATOS CAPTURADOS EN LA RASPBERRY.

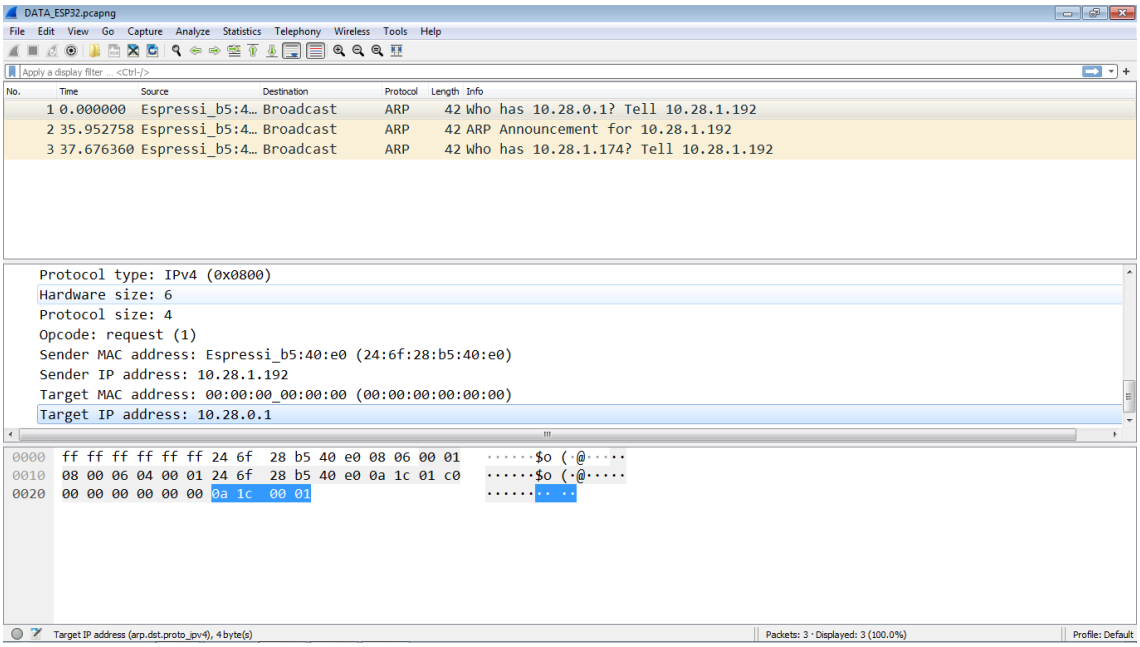


FIGURA 8. DATOS CAPTURADOS EN EL ESP32.

Finalmente, la información de la velocidad angular promedio es alojada en la nube a través del servidor dispuesto en *ThingSpeak*, tal como se presenta en la Figura 9.

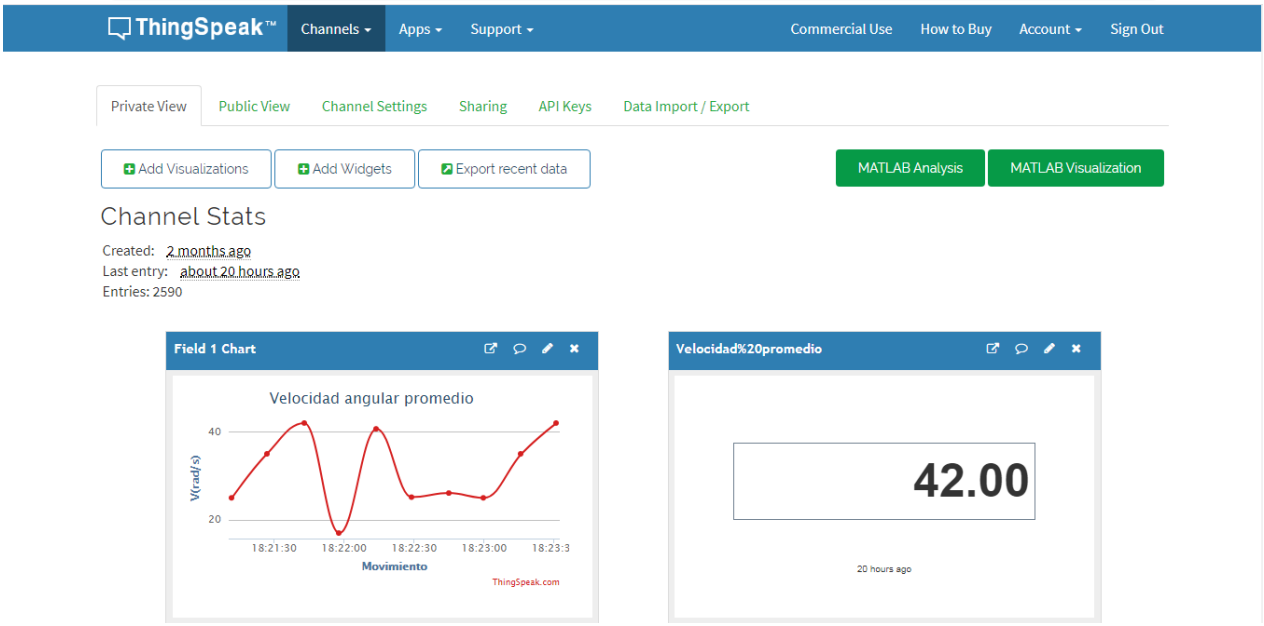


FIGURA 9. VELOCIDAD ANGULAR PROMEDIO ALOJADA EN EL SERVIDOR DE THINGSPEAK.

5. Conclusiones

El presente sistema de comunicación logró transmitir la información correspondiente a los movimientos del robot desde el PC al mismo robot, usando un WAP desarrollado con la Raspberry Pi 3 y un microcontrolador ESP32 ubicado en el robot. La Raspberry seleccionó desde el establecimiento de la comunicación el canal WiFi con mayor SNR, lo que conllevó a una menor pérdida de la información y mayor velocidad de transferencia frente a canales con menor SNR. Adicionalmente, en la nube se visualizó la información transmitida por el robot que fue la velocidad angular promedio con la que se desplazó el robot.

El modelo matemático implementado para calcular la SNR en los canales WiFi, aplica los fundamentos de la SDR, puesto que adapta las condiciones de hardware para elegir el canal más adecuado bajo este criterio.

ThingSpeak es una herramienta versátil para el envío de datos a la nube, permitiendo alojar una cantidad de datos considerables y mostrando gráficas básicas para el análisis periódico de los datos. Sin embargo, la versión gratuita de *ThingSpeak* tiene limitaciones en cuanto a los tiempos de intervalos de subida y actualización de las gráficas entre cada dato.

La Raspberry Pi 3 posee una interfaz de red inalámbrica, por tanto, al configurarla como WAP se limitó la cantidad de funcionalidades de las que se pudo disponer. Por

esta razón, se usó un PC para medir las potencias de los canales WiFi; sin embargo, esto puede ser solucionado si se utiliza un dongle USB en la Raspberry para darle mayor autonomía al sistema.

6. Bibliografía

1. Grubesic T.H. Future Shock: Telecommunications Technology and Infrastructure in Regional Research. In: Jackson R., Schaeffer P. (eds) Regional Research Frontiers - Vol. 1. Advances in Spatial Science (The Regional Science Series). Springer, Cham (2017)

2. Saber M., Aroussi H. K., El Rharras A., Saadane R., Raspberry Pi and RTL-SDR for Spectrum Sensing based on FM Real Signals, Int. Conf. Multimed. Comput. Syst. -Proceedings, vol. 2018-May, 1–6 (2018).

3. D. V., Kumar Singh A., Internet of Things: a Survey of the Advancements, Int. J. Eng. Technol., vol. 7, no. 3.12, 255 (2018).

4. Bloessl B., Segata M., Sommer C., Dressler F., Performance Assessment of IEEE 802.11p with an Open Source SDR-Based Prototype, IEEE Trans. Mob. Comput., vol. 17, no. 5, 1162–1175 (2018).

5. Ramírez B., A study of IEEE 802.11ah and its SDR implementation, Tesis, Esc. Técnica Super. Ing. Ind. y Telecomunicación, Univ. Pública Navarra, (2016).

6. Zitouni R., George L., Output power analysis of a software defined radio device, 2016 IEEE Radio Antenna Days Indian Ocean. RADIO 2016, 1–2 (2016).

7. Wai Zhao C., Jegatheesan J., Chee Loon S., Exploring IOT Application Using Raspberry Pi, Int. J. Comput. Networks Appl., vol. 2, no. 1, 27-34 (2015).

8. Mcbride W. J., Courter J. R., Using Raspberry Pi microcomputers to remotely monitor birds and collect environmental data, (2019).

9. Imteaj A., Rahman T., Hossain M. K., Zaman S., IoT based autonomous percipient irrigation system using raspberry Pi, 19th International Conference on Computer and Information Technology, ICCIT 2016, 563–568 (2017).

10. Kim Y., Evans R. G., Iversen W. M., Remote Sensing and Control of an Irrigation System Using a Distributed Wireless Sensor Network, IEEE Trans. Instrum. Meas., vol. 57, no. 7, 1379–1387 (2008).

11. Namala K. K., Krishna Kanth Prabhu A. V., Math A., Kumari A., Kulkarni S., Smart irrigation with embedded system, IEEE Bombay Section Symposium 2016: Frontiers of Technology: Fuelling Prosperity of Planet and People, IBSS 2016, (2017).

12. Vaishali S., Suraj S., Vignesh G., Dhivya S., Udhayakumar S., Mobile integrated smart irrigation management and monitoring system using IOT, 2017 International Conference on Communication and Signal Processing (ICCSP), 2164–2167 (2017).

13. Li X., Ding X., Zhang Y., Sun Z., Zhao H., IoT Family Robot Based on Raspberry Pi, 2016 International Conference on Information System and Artificial Intelligence (ISAI), Hong Kong, 622-625 (2016).

14. Güleçi M., Orhun M., Android based WI-FI controlled robot using Raspberry Pi, 2017 International Conference on Computer Science and Engineering (UBMK), Antalya, 978-982 (2017).

15. Hernández H., Estimación de una serie de movimientos utilizando un algoritmo de optimización bio-inspirado para la operación de manera autónoma y On-Line de una plataforma Multi-Robot (Caso robot modular), Tesis de Maestría en Ingeniería en Telecomunicaciones, Universidad Nacional de Colombia, (2018).

16. Horowitz M., WifiInfoView is a great Wi-Fi utility for Windows, https://www.computerworld.com/article/3225458/wifiinfoview-is-a-great-wi-fi-utility-for-windows.html (2017).

17. Dolińska I., Masiukiewicz A., Rządkowski G., The mathematical model for interference simulation and optimization in 802.11n networks, CEUR Workshop Proc., vol. 1032, 99–110 (2013).

Cálculo del rendimiento de combustible y las emisiones de bióxido de carbono de tractocamiones

Pantoja-Gallegos, J.L.,[1] Domínguez-Pérez, D.N.,[2] Domínguez-Vergara, N.[1]

[1]Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

[2]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

jpg@correo.azc.uam.mx, dannickfox@gmail.com, ndv@correo.azc.uam.mx

1. Resumen

Por medio del uso del paquete computacional, UAMmero, desarrollado en la Universidad Autónoma Metropolitana unidad Azcapotzalco, se calcula el consumo de combustible, las emisiones de bióxido de carbono y el rendimiento de combustible de un tractocamión de 3 ejes durante tres

ciclos de manejo para 2 cargas diferentes, 17236 y 22258 kilogramos. También se realizan los cálculos para dos valores de inclinación de la carretera, 0 y 1.5 grados. La carga de 17236 kilogramos y la inclinación de 0 grados son las variables que se usan en Estados Unidos para la certificación de los tractocamiones nuevos al consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono. Los cálculos que se realizaron en este trabajo son los que se llevarían a cabo para certificar a los tractocamiones nuevos de 3 ejes al consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero en México.

2. Introducción

En Japón, Estados Unidos [1], China, Canadá, la Unión Europea e India se han implantado o se están implantando normas de consumo de combustible o de emisiones de bióxido de carbono de los vehículos pesados nuevos. Los vehículos pesados son aquellos que pesan más de 3.857 toneladas (tons) e incluyen camionetas pesadas, tortones, carros utilitarios como de la basura y tractocamiones entre muchos otros. El consumo de combustible de los tractocamiones de 3 ejes cambia significativamente cuando se le cambia el remolque que arrastran porque modifican las características físicas de la combinación tráiler-remolque, o sea la aerodinámica del vehículo, el coeficiente de fricción de sus llantas y los momentos de inercia de las partes del vehículo que rotan, entre otras cosas. Por toda la gran variedad de los vehículos pesados es más conveniente certificarlos en su consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono, no con un dinamómetro de chasis como el que se usa para certificar a los automóviles, sino mediante un software que simule su recorrido en carretera. Los tractocamiones de 3 ejes son los vehículos pesados que más consumen combustible y por lo tanto a los que se les debiera regular primero en México; sin embargo, la metodología descrita en este trabajo para la evaluación del rendimiento energético y las emisiones de bióxido de carbono, es la base que se puede aplicar al resto de los vehículos pesados. Existen unas pocas herramientas computacionales en el mundo que se usan o usarán para certificar a los vehículos pesados, entre ellos se encuentran el Vehicle Energy Consumption calculation TOol (VECTO) [2] desarrollado por la Unión Europea y el Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) [3] desarrollado por la Agencia de Protección Ambiental (EPA) de Estados Unidos de América. En la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM) los autores han estado desarrollando UAMmero [4] con el mismo propósito. Para certificar a los vehículos pesados se simula, usando un software, el movimiento de los vehículos en ciclos de manejo, como si estuvieran en un dinamómetro de chasis. En Estados Unidos, para certificar un vehículo pesado, el GEM simula que se mueve en 3 ciclos de manejo, el transitorio ARB, velocidad crucero de 55 millas por hora y velocidad crucero de 65 millas por hora [3]. Con el software VECTO se simula que cada vehículo pesado se mueve en un ciclo de manejo que depende del uso que se dé al vehículo. En el mundo se escogen ciclos de manejo diferentes porque las distancias recorridas y la geografía por la que se mueven los vehículos pesados no son las mismas; por ejemplo, Estados Unidos tiene carreteras muy largas a lo largo y ancho del país, mientras que en Japón los recorridos en carretera no son muy largos, también los límites de las cargas transportadas y las dimensiones que tienen los vehículos son diferentes en los distintos países. En México se tiene la peculiaridad de que las cargas transportadas son grandes con el fin de reducir los costos de operación y de que las carreteras por las que se transportan los bienes tienen pendientes diferentes de cero, es decir, parte

de sus trayectos tienen una inclinación (porque se han construido sobre montañas). En este trabajo usando UAMmero, se reportan los cálculos del consumo de combustible, las emisiones de bióxido de carbono (CO2) y el rendimiento de combustible de un tractocamión de 3 ejes que se mueve en los 3 ciclos de manejo mencionados anteriormente. El estudio de los tractocamiones de 3 ejes se debe a que son los vehículos más usados para transportar las cargas más grandes. En trabajos futuros se detallarán los resultados para vehículos menos pesados que tienen otros números de ejes así como otras características tecnológicas diferentes a los reportados en este trabajo. Los cálculos se realizan para dos trayectos diferentes (dos pendientes diferentes) y con dos cargas de diferentes masas, para mostrar la manera en que se usaría UAMmero para certificar tractocamiones de 3 ejes. Desde luego que el grupo que trabaje en la elaboración de la norma mexicana definiría la inclinación y la carga con la que se correría UAMmero u otro software para demostrar si un tractocamión cumple con los límites de consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono que establezca la norma.

3. Cálculo del consumo de combustible y emisiones de CO2

El paquete computacional UAMmero simula el movimiento de un vehículo pesado en los 3 ciclos de manejo mencionados anteriormente así como también en carreteras de México [4], aunque en este trabajo no realizamos cálculos para viajes del vehículo en carreteras del país. La dinámica vehicular está descrita en la Ecuación (1) [4][5][6].

$$(M ¿¿ + m_{inercial})\, a = \frac{T_e N_{td}}{r_w} - ¿ F_a - F_p - F_r ¿¿ \qquad (1)$$

Donde F_a, es la fuerza aerodinámica, F_p la fuerza debida a la pendiente del recorrido, F_r la fuerza de fricción debida al rodamiento de las llantas, M es la masa del vehículo (tráiler, más remolque y carga), $m_{inercial}$ la masa inercial, a la magnitud de la aceleración lineal del vehículo, r_w el radio de las llantas y T_e el torque del motor. En este modelo el vehículo se mueve en línea recta. N_{td} representa las relaciones combinadas de la transmisión y el diferencial incluyendo las eficiencias de la transmisión y el diferencial; esta variable es más compleja para tractocamiones con muchas ruedas y ejes. Los valores de las variables que aparecen en la Ecuación (1) se reportan en la referencia 6 o en la segunda columna de la Tabla 2 de la referencia 3. Así, en este trabajo consideramos que la masa total del tractocamión más el tráiler (sin carga) es de 14.742 tons. Cada tractocamión a certificar tendrá una masa y otras variables del vehículo diferentes (que conforman un paquete tecnológico) a las que se usan en el ejemplo de este trabajo y esas son las que deben usarse para modelar el vehículo en UAMmero u otro software y certificar si cumple con los límites de consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono que establezca la norma que se implante.

En Estados Unidos, con el GEM, se simula que el vehículo se mueve en los 3 ciclos de manejo mencionados anteriormente y que el recorrido tiene un pendiente cero; pero en México podría considerarse para la certificación que no sea ese valor sino que el recorrido tenga una inclinación diferente de cero dadas las carreteras que se tienen en el país, por ejemplo que tiene una inclinación de 1.5 grados. Lo mismo para la carga, debido a que en México se sobrecarga a los vehículos bien podría considerarse que la carga que se considere para certificar el tractocamión sea un poco mayor que la que se usa en Estados Unidos (que es de 17.236 tons) y se podría considerar una carga de 22.258 tons (para una masa total en movimiento en la Ecuación 1 de M=37 tons). Más abajo presentamos los resultados de las simulaciones con inclinaciones de los recorridos de 0 y 1.5 grados y con cargas de 17.236 y 22.258 tons. Las cargas y pendientes que se deben usar para la certificación de los tractocamiones en México se tendrán que definir en el grupo de trabajo que diseñe la norma, pero lo que se establece en este trabajo es que los autores ya están construyendo la herramienta que se puede usar para la certificación: UAMmero.

En un trabajo anterior [6] se estudió, usando UAMmero, el efecto del aumento de la carga y la variación en la inclinación del recorrido para dos tipos de vehículos pesados para el caso en el que los vehículos se mueven con una rapidez constante.

En UAMmero se obtiene el avance del vehículo en el tiempo al programar que el vehículo se mueve a la rapidez que está determinada por los 3 ciclos que son el ciclo transitorio ARB, el ciclo de velocidad crucero de 55 millas por hora y el ciclo de velocidad crucero de 65 millas por hora que se muestran en la Figura 1. En la Figura 1 se muestra la rapidez contra el tiempo de esos 3 ciclos. El ciclo transitorio ARB modela que el vehículo se mueve en un calle o trayecto urbano, el segundo ciclo modela que el vehículo se mueve en un carretera cuya máxima rapidez que se puede alcanzar es de 55 millas por hora (88.5115 km/hora) y el tercer ciclo modela que el vehículo se mueve a una rapidez máxima de 65 millas por hora (104.6045 km/hora). Si la carga es muy pequeña y se simula que la pendiente del camino es cero (carretera plana) la rapidez del vehículo será muy cercana a la programada; sin embargo si la carga transportada aumenta o si se simula que el vehículo viaja por una carretera que tiene una pendiente positiva (subida) entonces la rapidez del vehículo disminuye porque el motor no podrá proporcionar el torque ni la potencia requerida para que el vehículo viaje a la rapidez programada. En UAMmero se reduce la rapidez a la que viaja el vehículo de tal manera que ni el torque ni la potencia que puede proporcionar el motor rebasen sus máximos.

El paquete UAMmero ha sido desarrollado en C y usa la paquetería gratuita de koolplots para la graficación de resultados.

En este trabajo, se usa UAMmero, para calcular el consumo de combustible, las emisiones de bióxido de carbono y el rendimiento de combustible de un tractocamión de 3 ejes que tiene una masa de 14.742 tons sin carga y que transporta cargas de 17.236 tons o 22.258 tons y para cada carga se considera que la carretera tiene 0 o 1.5 grados de inclinación.

4. Resultados y discusión

En la Figura 1 se muestra el resultado de la rapidez (km/hora) contra el tiempo (segundos) de un tractocamión que se programa para moverse en los 3 ciclos de manejo con una carga de 17.236 tons en un recorrido que tiene una inclinación de 0 grados.

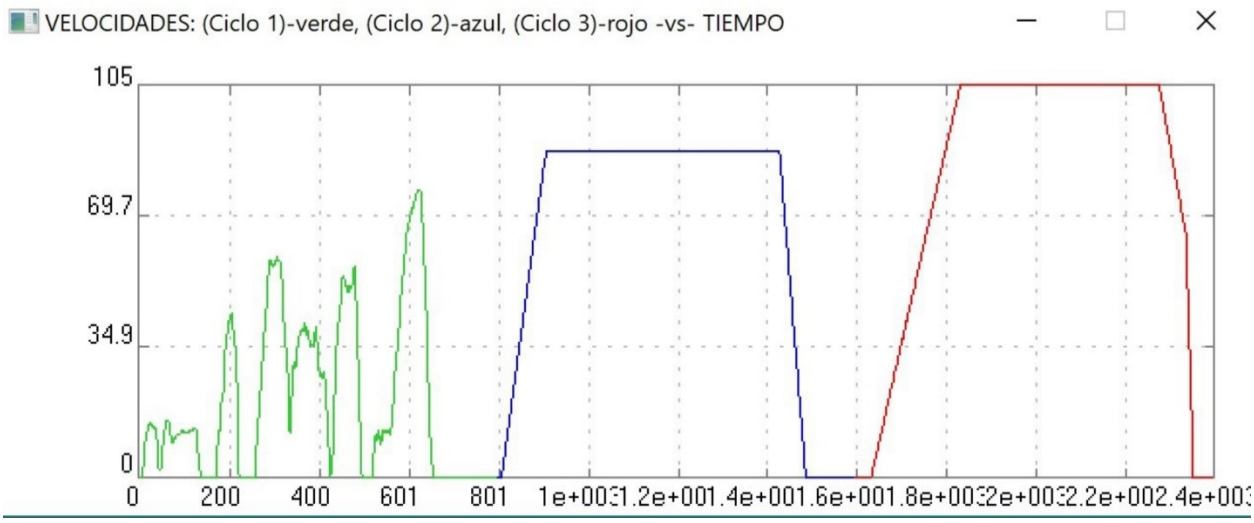


Figura 1. Rapidez (km/hora) contra tiempo (segundos) para un tractocamión con carga de 17.236 tons en un recorrido con inclinación de 0 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

En la Figura 2 se muestra la rapidez contra el tiempo (en segundos) para el caso del tractocamión que transporta una carga de 22.258 tons y en un recorrido que tiene una inclinación de 1.5 grados. Se puede observar que la rapidez del vehículo en este caso no alcanza los máximos de rapidez programada porque su carga es mayor y viaja en una trayectoria que tiene una pendiente de 1.5 grados. En la simulación de UAMmero si el vehículo va aumentando su rapidez o su aceleración lineal se checa en cada instante si rebasaría en el siguiente intervalo de tiempo el torque o la potencia máximos, si eso sucediera se disminuye la rapidez en el siguiente intervalo de tiempo de acuerdo a los máximos del torque y la potencia. En la gráfica de la rapidez contra el tiempo los puntos en los que el vehículo viaja usando el máximo torque o potencia se distinguen porque la rapidez es constante y a un valor menor que el programado.

En la Tabla 1 se presentan los resultados del consumo de combustible en litros (Consumo), el consumo de combustible por tonelada transportada en litros/(kilómetro*tonelada) (Cons), las emisiones de bióxido de carbono en gramos/(kilómetro*tonelada) (Emis), para cada uno de los 3 ciclos de manejo. En la quinta columna de la tabla también se reportan los resultados del consumo de combustible total y la distancia recorrida total en los 3 ciclos de manejo. La carga se proporciona en toneladas (tons), la inclinación en grados y la distancia en kilómetros.

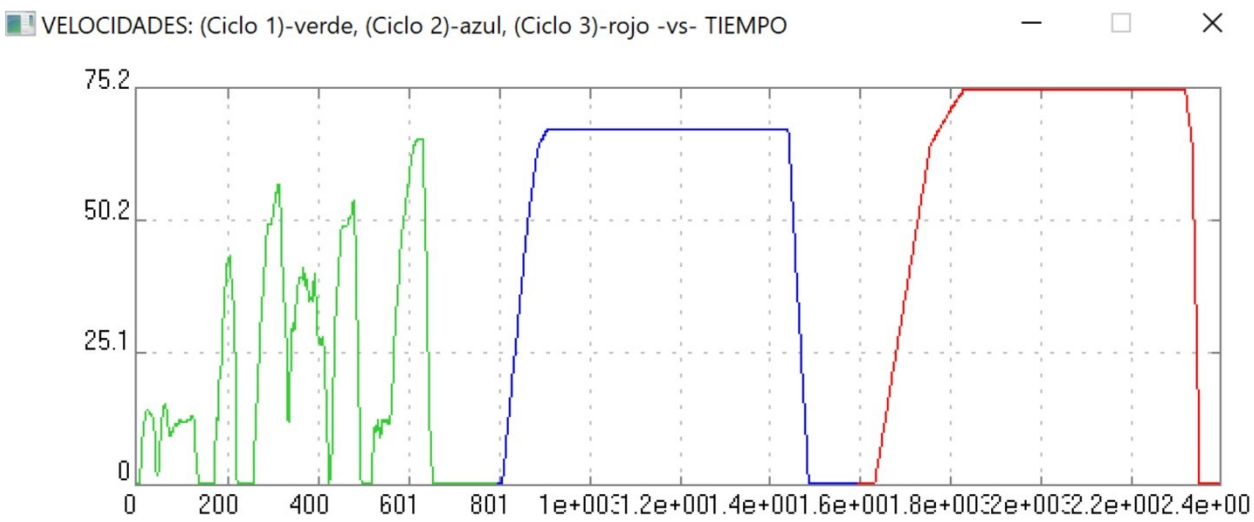


Figura 2. Rapidez (km/hora) contra tiempo (segundos) para un tractocamión con carga de 22.258 tons en un recorrido con inclinación de 1.5 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

Tabla 1. Consumo de combustible en litros (Consumo), consumo de combustible por tonelada transportada en litros/(kilómetro*tonelada) (Cons), *emisiones de bióxido de carbono en* gramos/(kilómetro*tonelada) (Emis) y distancia recorrida en kilómetros *para viajes de un tractocamión con dos cargas diferentes y dos recorridos con inclinaciones diferentes.*

	Ciclo			
	Transitorio (urbano)	**88.5115 (km/hora)**	**104.6045 (km/hora)**	**Total 3 ciclos**
Carga 17.236 tons Inclinación 0 grados	Consumo=2.3478	Consumo=4.7998	Consumo= 6.6369	Consumo=13.7845 Distancia=36.7136
	Cons= 0.0298	Cons=0.0189	Cons= 0.0221	
	Emis=77.4331	Emis=49.0795	Emis=57.5790	
Carga 22.258 tons Inclinación 0 grados	Consumo= 2.5779	Consumo= 5.0382	Consumo= 7.0635	Consumo=14.6796 Distancia=36.7136
	Cons= 0.0253	Cons=0.01534	Cons= 0.0183	
	Emis= 65.8400	Emis=39.8933	Emis=47.4536	
Carga	Consumo=3.611003	Consumo=	Consumo= 9.7168	Consumo=22.8527

17.236 tons Inclinación 1.5 grados		9.524913		Distancia=36.7136
	Cons=0.0458	Cons=0.0374	Cons=0.0324	
	Emis=119.0958	Emis=97.3952	Emis= 84.2986	
Carga 22.258 tons Inclinación 1.5 grados	Consumo= 4.0685	Consumo=9.7355	Consumo= 11.7128	Consumo=25.5167 Distancia=36.7136
	Cons= 0.0400	Cons=0.0296	Cons=0.0303	
	Emis= 103.9085	Emis= 77.0873	Emis= 78.6880	

En la tabla 1 se nota que conforme aumenta la carga transportada por el tractocamión aumenta el consumo de combustible. De la misma manera si aumenta la inclinación en la que se mueve el tractocamión aumenta el consumo de combustible. El consumo de combustible (en litros) es mayor si aumenta la carga y también la inclinación del recorrido.

En la Figura 3 se muestra el consumo de combustible acumulado contra el tiempo para el caso de una carga de 17.236 tons e inclinación de 0 grados. En la Figura 4 se muestra el consumo de combustible contra el tiempo para una carga de *22.258* tons e inclinación de 1.5 grados.

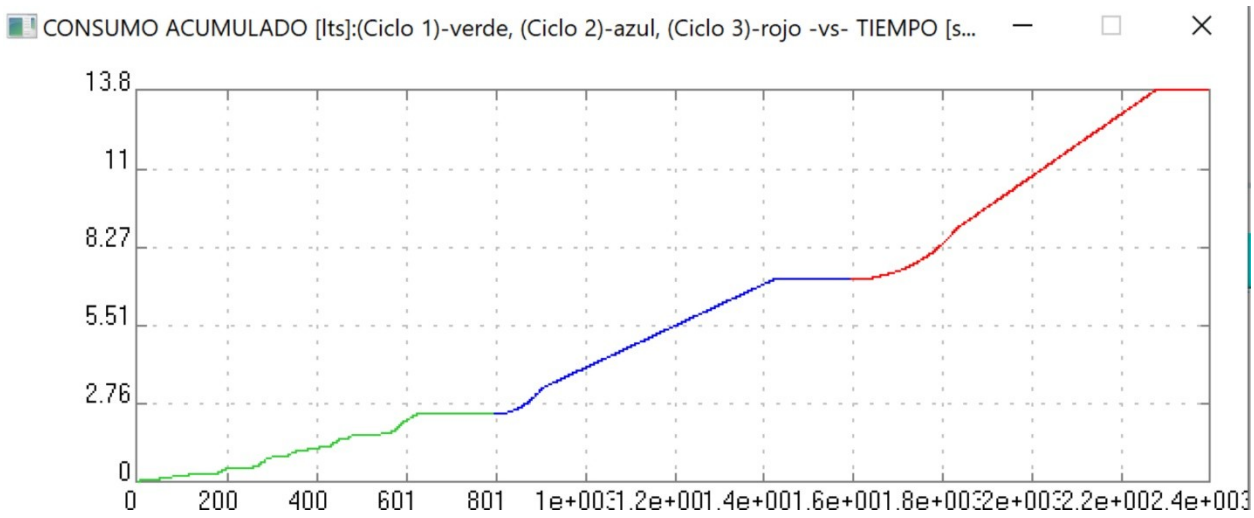


Figura 3. Consumo de combustible (litros) contra tiempo (segundos) para una carga de 17.236 tons e inclinación del recorrido de 0 grados.

En las Figuras 3 y 4 se muestra el consumo de combustible del tractocamión conforme el vehículo se mueve en cada uno de los ciclos. Los consumos de combustible aumentan más rápidamente cuando el vehículo se acelera, si el vehículo viaja a rapidez constante el aumento en el consumo tiene un comportamiento lineal. En el modelo UAMmero el vehículo no consume combustible si desacelera.

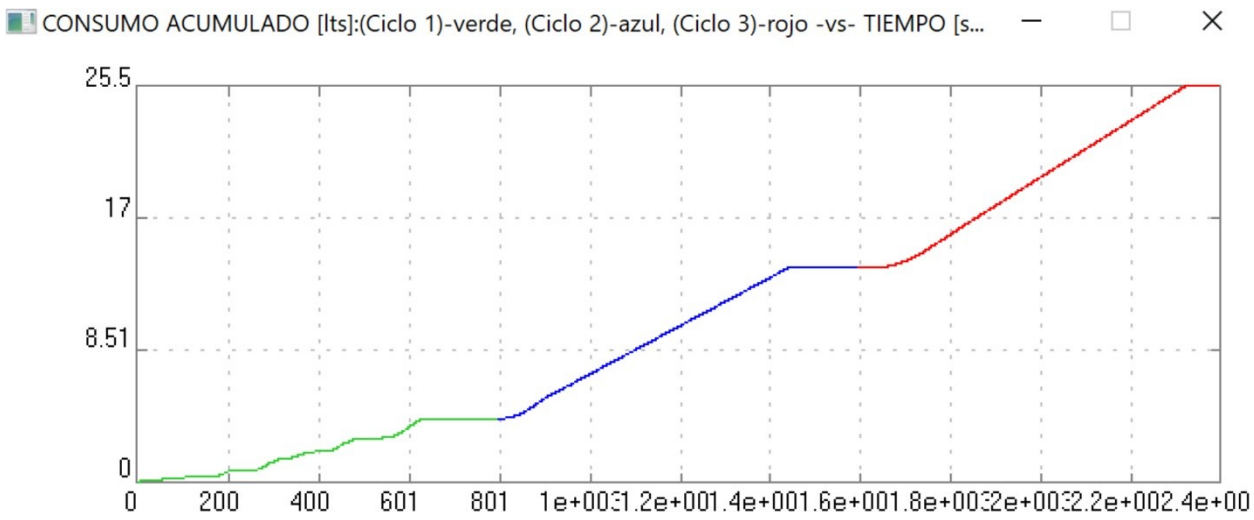


Figura 4. Consumo de combustible (litros) contra tiempo (segundos) para una carga de 22.258 tons e inclinación del recorrido de 1.5 grados.

En la Figura 5 se muestra el rendimiento de combustible instantáneo en kilómetros por litro contra la distancia recorrida para una carga de 17.236 tons e inclinación del recorrido de 0 grados. En la Figura 6 se muestra el rendimiento de combustible para una carga de 22.258 tons e inclinación del recorrido de 1.5 grados.

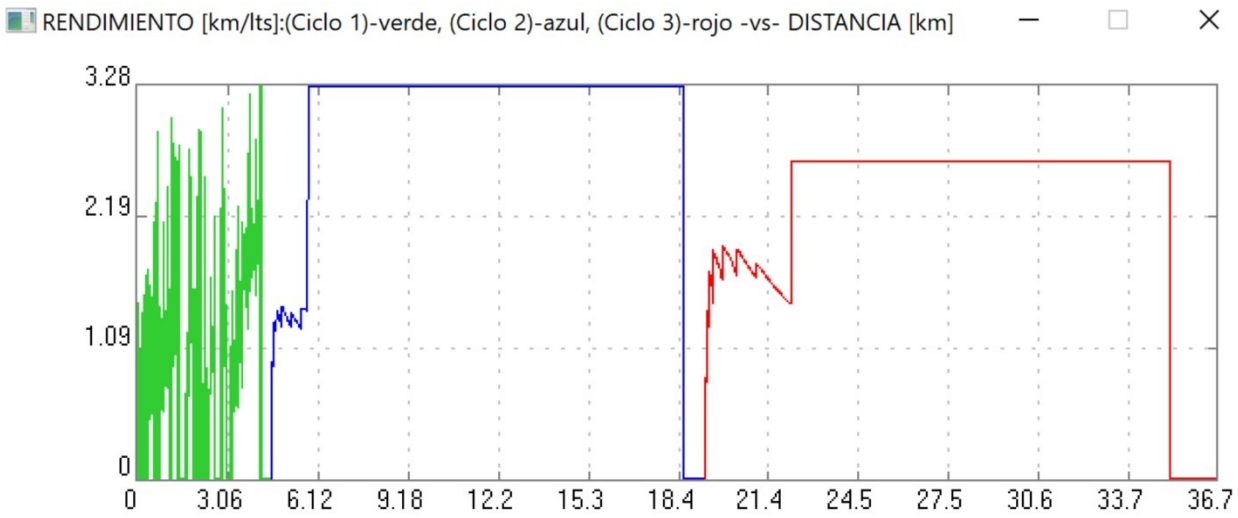


Figura 5. Rendimiento de combustible instantáneo (kilómetros/litro) contra tiempo (segundos) para una carga de 17.236 tons e inclinación del recorrido de 0 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

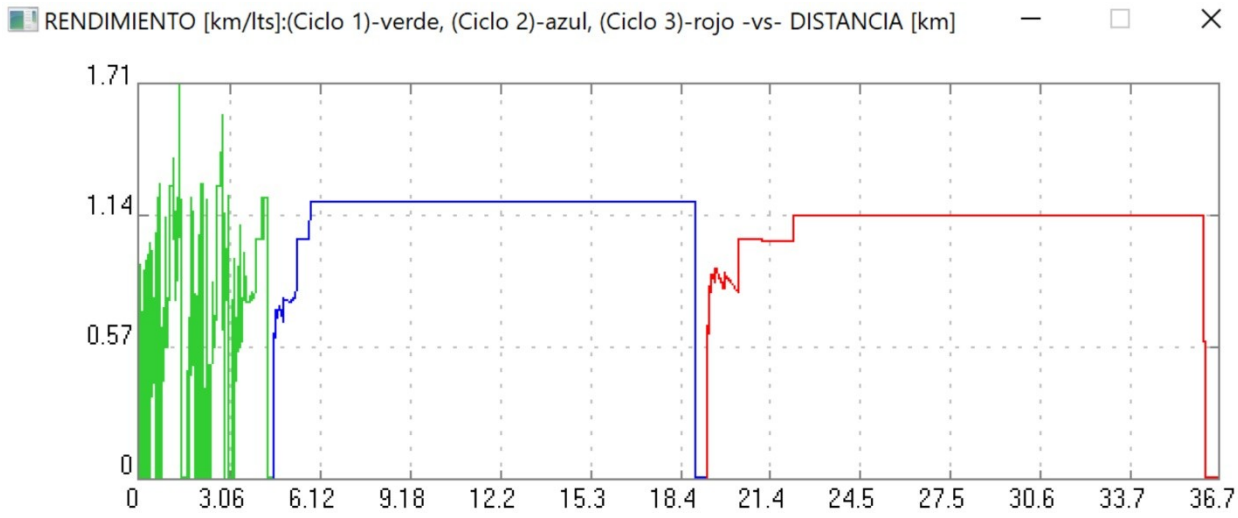


Figura 6. Rendimiento de combustible instantáneo (kilómetros/litro) contra tiempo (segundos) para una carga de 22.258 tons e inclinación del recorrido de 1.5 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

El rendimiento de combustible disminuye cuando la carga aumenta o la inclinación del recorrido aumenta (en subidas) como se muestra en los resultados de las Figuras 5 y 6. En el primer

ciclo cambia mucho el rendimiento debido a los cambios en la aceleración del vehículo. En el segundo y tercer ciclo el máximo de rendimiento se alcanza cuando el vehículo no se acelera (viaja con una rapidez constante).

En la Figura 7 se muestra el torque en Newtons-metro contra el tiempo en segundos, necesario para que el tractocamión se mueva para una carga de 17.236 tons e inclinación del recorrido de 0 grados. En la Figura 8 se muestra el torque contra el tiempo para una carga de 22.258 tons e inclinación del recorrido de 1.5 grados.

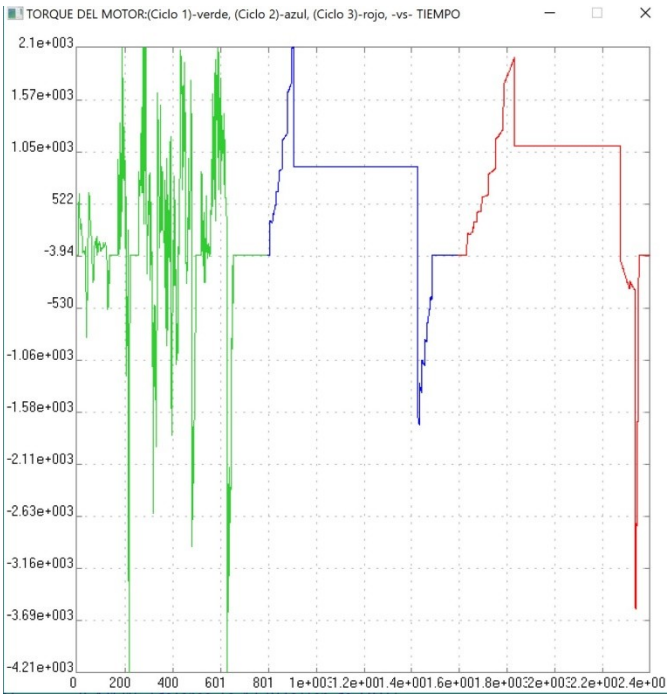


Figura 7. Torque (Newtons-metro) contra el tiempo (segundos) para una carga de 17.236 tons e inclinación del recorrido de 0 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

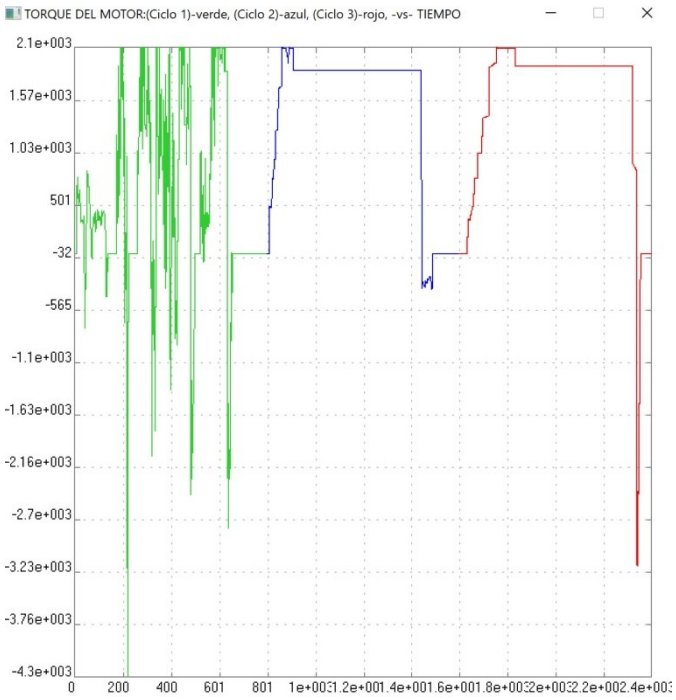


Figura 8. Torque (Newtons-metro) contra tiempo (segundos) para una carga de 22.258 tons e inclinación del recorrido de 1.5 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

En la Figura 9 se muestra la potencia en kilowatts contra el tiempo en segundos, necesaria para mover el vehículo para una carga de 17.236 tons e inclinación del recorrido de 0 grados.

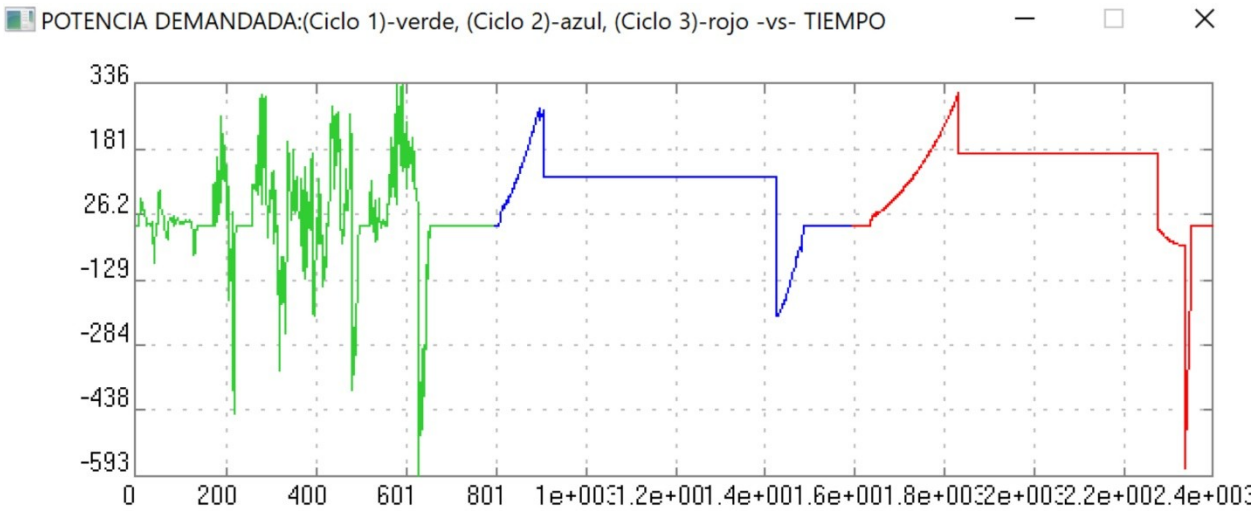


Figura 9. Potencia (kilowatts) contra tiempo (segundos) para una carga de 17.236 tons e inclinación del recorrido de 0 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

En la Figura 10 se muestra la potencia (kilowatts) contra el tiempo (segundos) para una carga de 22.258 tons e inclinación de 1.5 grados.

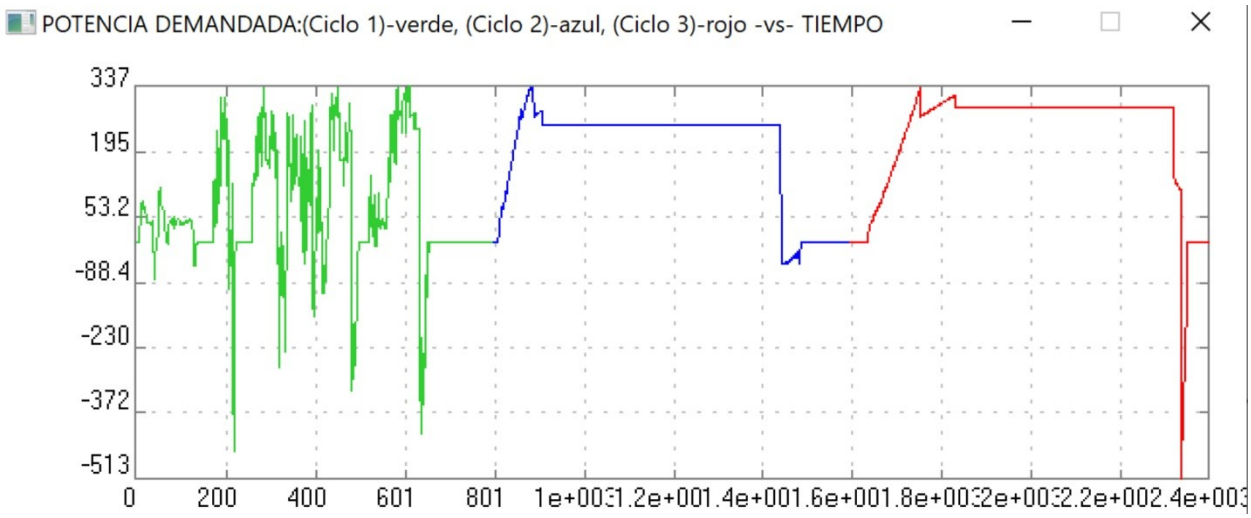


Figura 10. Potencia (kilowatts) contra tiempo (segundos) para una carga de 22.258 tons e inclinación del recorrido de 1.5 grados. (Resultados como los proporciona UAMmero.)

5. Conclusiones

UAMmero, podría ser una herramienta apropiada para la certificación en México de tractocamiones nuevos al consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono mediante la simulación matemática.

El consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono resultantes de cualquiera de los cuatro casos estudiados bien podrían ser los límites de consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de los tractocamiones de una norma mexicana, si se encuentra que el costo beneficio es adecuado; un estudio para determinarlo se explica en otro trabajo de los autores que también se publicará. O los límites podrían establecerse como un promedio pesado de los resultados de cada uno de los 3 ciclos.

6. Bibliografía

1. EPA y NHTSA., “Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles — Phase 2”, Federal Register, V. 81, No. 206 (2016).
2. European Commission, “Vehicle Energy Consumption calculation TOol – VECTO”, Consultado abril 6, 2020. Bajado de https://ec.europa.eu/clima/policies/transport/vehicles/vecto_en
3. EPA., “Greenhouse Gas Emissions Model (GEM) User Guide”, 2010.
4. Domínguez Vergara N., Pantoja-Gallegos J.L., Domínguez-Pérez D.N., “UAMmero, software para estimar el consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono de vehículos pesados”, del Congreso multidisciplinario de ciencias aplicadas en Latinoamérica, Editorial UNAM, 600-606 (2018).
5. Kiencke U., Nielsen L., “Automotive Control Systems, For Engine, Driveline, and Vehicle”, Springer-Verlag, 2005.
6. Domínguez Vergara N., Pantoja Gallegos J.L. y Domínguez Pérez D.N., “Análisis de un modelo para la certificación de vehículos pesados”, Libro Científico I, 2018, del Congreso Internacional Mujeres en las Ciencias, Editorial UAM, 113-126 (2018).

7. Agradecimientos

A J. García Osorio y A. Maldonado Susano. También a los revisores por sus valiosas observaciones. Uno de los autores (N. D.-V.) le agradece a H. Pérez-Vivián por su valioso apoyo.

Cinemática del flujo en contenedores cilíndricos con impulsores de flujo axial descendente y ascendente

Lizardi, R. A.[1], López, C. R.[1], Terres, P. H.[1], Chaves, S. S[1]., Vaca, M. M.[1], Lara, V. A.[1], Morales, G. J. R[1]

[1]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía Azcapotzalco, C. P. 02200, Ciudad de México, México

arlr@azc.uam.mx, rlc@azc.uam.mx, tph@azc.uam.mx, scs@azc.uam.mx,
mvm@azc.uam.mx, arlv@azc.uam.mx, mgjr@azc.uam.mx

1. Resumen

Este trabajo trata del movimiento de un fluido dentro de un tanque cilíndrico que es promovido por la rotación de un eje que tiene: en un caso dos impulsores de disco y en otro caso dos impulsores de flujo axial, uno descendente y otro ascendente. La fundamentación matemática se basa en las ecuaciones de continuidad y momentum. Los resultados se muestran con los campos del vector velocidad ($\vec{V}$) y las componentes de velocidad radial (u) y axial (w). Comparando la gráfica de la componente de velocidad radial, en la posición m1=2 cm, y de la componente de velocidad axial, en las posiciones m2= 1.25, m3=3.75 y m4=4.75 cm, para ambos modelos, se encontró que el sistema con impulsores de flujo axial obtuvo el mejor desempeño pues incrementó la velocidad radial y axial positiva y negativa promedio en: 336 y 124%, 105 y 138%, 21 y 621%, 2 y 258%, respectivamente.

2. Introducción

La agitación y el mezclado son operaciones unitarias que se presentan en buena parte de los procesos industriales. Su uso se extiende en diversos campos de la industria alimentaria, cosmetológica, química, petroquímica, entre otras. La agitación consiste en forzar el movimiento de un fluido por medios mecánicos para que éste adquiera un flujo circulatorio en el interior de un depósito; mientras que el mezclado pretende conseguir la máxima interposición entre materiales para obtener un grado determinado de uniformidad entre los mismos [1] y [2].

El objetivo de este trabajo es determinar los patrones de flujo en estado permanente de un fluido newtoniano, viscoso e incompresible, confinado en un contenedor cilíndrico vertical cerrado. El movimiento del fluido en el depósito se genera a través de una flecha que gira en sentido horario y que tiene montados dos impulsores; uno en la parte inferior (cerca del fondo del tanque) y otro en la parte superior (cerca de la tapa del mismo). En el estudio se manejan dos modelos: en el primero se colocan dos impulsores de disco y en el segundo se colocan dos impulsores de flujo axial con tres álabes verticales rectos (el inferior con un ángulo de inclinación respecto a la vertical de +30° y el superior con un ángulo de -30°). Lo anterior con el propósito de que el impulsor inferior y superior favorezcan el movimiento del fluido hacia el fondo y tapa del recipiente, respectivamente. La fundamentación matemática se basa en las ecuaciones de continuidad y momentum en coordenadas polares cilíndricas, en estado permanente, junto con las condiciones de frontera adecuadas. Los resultados se obtendrán al comparar los patrones de flujo del vector velocidad ($\vec{V}$) y de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w) para cuatro posiciones de interés y para los dos modelos. Se manejará agua como fluido de trabajo, una relación altura/radio del contenedor constante y la misma velocidad angular.

El análisis numérico y experimental del movimiento de fluidos en el interior de cilindros verticales se ha abordado desde la tercera parte del siglo pasado. Por ejemplo, Pao [3] propuso un método numérico para estudiar un fluido viscoso incompresible confinado en una cámara cilíndrica donde la tapa superior estaba rotando a una velocidad angular constante y las paredes y fondo del recipiente permanecían fijos. Analizó la función corriente, la circulación, la distribución de velocidades y el coeficiente de par para un rango del número de Reynolds de 1 a 400. Bertelá y Gori [4] presentaron un método numérico que permitía resolver el flujo estable y transitorio de un fluido dentro de un depósito cilíndrico con la cubierta rotando. En el estudio analizaron las componentes de velocidad, líneas de corriente y coeficiente de torque para un número de Reynolds de 100 y 1000, y para una relación geométrica de 0.5, 1 y 2.

Otros investigadores empezaron a estudiar el movimiento inducido por discos giratorios dentro de tanques cilíndricos. Khalili, et al. [5] obtuvieron una solución numérica para un flujo laminar inducido, dentro de un cilindro, por un disco rotatorio situado asimétricamente respecto a la altura. Presentaron el análisis de las líneas de corriente, de la componente de velocidad tangencial y del coeficiente de torque para distintos posicionamientos del disco, para una relación geométrica de 1 a 2 y para un rango de números de Reynolds de 1 a 5000. Yu, et al. [6] estudiaron numéricamente el flujo en una cámara cilíndrica cerrada con un disco giratorio en el fondo y cuyo radio era menor al de la cámara. El comportamiento del flujo se investigó para una amplia gama de parámetros. Se analizaron, en el plano meridional, las líneas de corriente, momento angular y vorticidad, para diferentes Reynolds (1000, 1500 y 2000), relación geométrica H/R (1.5) y relación de radios R/rd (1.5, 1.8, 2.0, 2.2, 2.6, 3.0, 5.0).

En los últimos años y debido a los grandes avances en CFD (Computational Fluid Dynamic), se han resuelto problemas que involucran geometrías complejas y flujos turbulentos, Achouri, et al. [7] realizaron un estudio de un tanque agitado con impulsores de pala inclinada PBT (Pitched Blade Turbine, por sus siglas en inglés) compuestos por seis alabes y con flujo descendente. El tanque se simuló para flujos multifásicos de gas-líquido a una velocidad constante del impulsor de 480 rpm y con dos inclinaciones de alabes diferentes: 45° y 60°. Ameur [8] presenta los resultados numéricos sobre la mezcla de fluidos complejos con agitadores de dos placas planas verticales e inclinadas. Analizó los efectos del ángulo de inclinación de las palas sobre las características locales y globales de la mezcla. También se estudió el efecto del número de Reynolds con el comportamiento reológico de la mezcla.

3 Planteamiento y solución del problema

3.1 Sistema físico

El modelo a analizar consiste en un tanque cilíndrico vertical cerrado de 4.5 cm de radio, 9 cm de parte recta y 3 cm de fondo. En el eje se acoplan por separado dos impulsores: de disco y de flujo axial, con álabes inclinados a ±30°. Los impulsores de disco tienen un radio de 2 cm y una altura de 0.5 cm (Fig. 1 y 2). Los impulsores de flujo axial tienen un radio proyectado de 2 cm y tres álabes rectos de 0.5 cm de altura por 0.1 cm de espesor (Fig. 2 y 3). Los impulsores están unidos por una flecha de 0.5 cm de radio que gira en sentido horario a una velocidad angular constante de 13.61 rad/s.

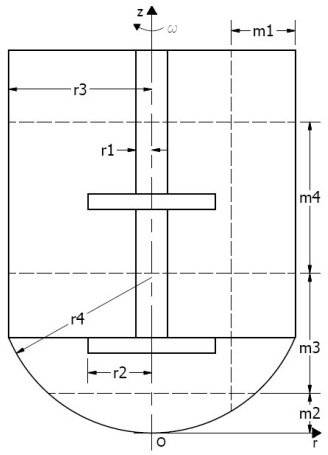


Figura 1 Modelo con impulsores de disco y líneas de referencia para el análisis de velocidades

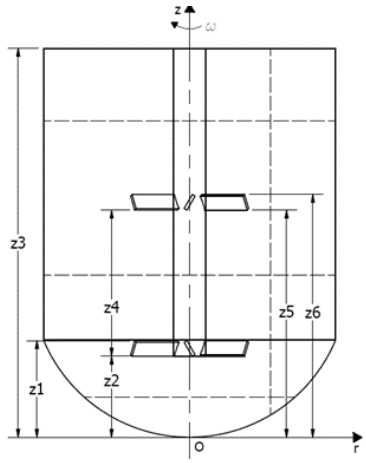


Figura 2 Modelo con impulsores de flujo axial (±30°)

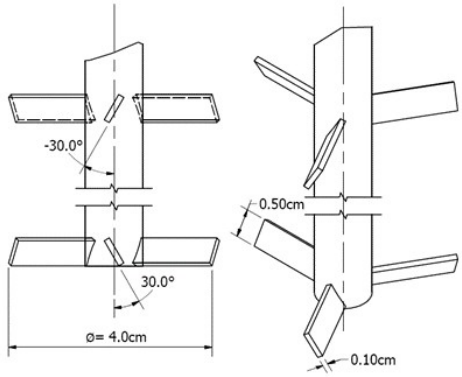


Figura 3 Detalle de los impulsores de flujo axial

Los impulsores de flujo axial que se ubican en la parte inferior y superior del recipiente, tienen tres álabes con un ángulo de inclinación de +30° y -30°, respectivamente (Fig. 2 y 3). Lo anterior tiene por objeto que, al girar el eje en sentido horario, el impulsor de abajo expulse al fluido hacia el fondo del tanque, y el impulsor de arriba proyecte al fluido hacia la tapa del depósito; mejorando con esto el movimiento del fluido en el contenedor. La sustancia empleada en la simulación es agua y se considera como un fluido viscoso e incompresible de propiedades físicas constantes.

7.2 Ecuaciones gobernantes

Las ecuaciones que definen el flujo de un fluido newtoniano, viscoso, incompresible, en estado permanente, en el interior de un recipiente cilíndrico, son las ecuaciones de continuidad y momentum en coordenadas cilíndricas [9] y [10].

$$\frac{1}{r}\frac{\partial}{\partial r}(ru)+\frac{1}{r}\frac{\partial v}{\partial \theta}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

$$u\frac{\partial u}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial u}{\partial \theta}-\frac{v^2}{r}+w\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{-1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial r}+\nu\left[\nabla^2 u-\frac{u}{r^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial v}{\partial \theta}\right] \quad (2)$$

$$u\frac{\partial v}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial v}{\partial \theta}-\frac{uv}{r}+w\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{-1}{\rho r}\frac{\partial P}{\partial \theta}+\nu\left[\nabla^2 v-\frac{v}{r^2}-\frac{2}{r^2}\frac{\partial u}{\partial \theta}\right] \quad (3)$$

$$u\frac{\partial w}{\partial r}+\frac{v}{r}\frac{\partial w}{\partial \theta}+w\frac{\partial w}{\partial z}=\frac{-1}{\rho}\frac{\partial P}{\partial z}+\nu\nabla^2 w+g \quad (4)$$

Las incógnitas de estas expresiones son las tres componentes de velocidad: radial (u), azimutal o tangencial (v), y axial (w); y la presión (P). Pero se tiene la dificultad de que la presión en el seno del fluido depende de las componentes de velocidad. Las condiciones de frontera adecuadas para el modelo con impulsores de disco se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1 Condiciones de frontera para el modelo con impulsores de disco

$r=0$ $0\le z\le z_3$	$u=0,$	$v=0,$	$\frac{\partial w}{\partial r}$	(5)
$r=r_3$ $z_1\le z\le z_3$	$u=0,$	$v=0,$	$w=$	(6)
$0\le r\le r_2$ $z=z_2$ $r_1\le r\le r_2$ $z=z_1,\ z=z_5,\ z=z_6$	$u=0,$	$v=\omega r$	$w=$	(7)
$z_2\le z\le z_1$ $z_5\le z\le z_6$ $r=r_2$ $z_1\le z\le z_3$ $r=r_1$	$u=0,$	$v=\omega r$	$w=$	(8)
$0\le r\le r_3$ $z=z_3,\ r=r_4$	$u=0,$	$v=0,$	$w=$	(9)

En las condiciones de frontera r_1, r_2 y r_3 corresponden al radio de la flecha, del impulsor y del tanque, respectivamente; z_1 y z_3, es la distancia desde el fondo del recipiente hasta la parte recta y tapa del depósito, respectivamente, z_2 y z_1, z_5 y z_6, son las distancias desde el fondo del depósito hasta la parte inferior y superior de los impulsores, respectivamente; y ω es la velocidad angular con que giran los impulsores y la flecha (Figs. 1, 2). Para sistemas rotatorios el número de Reynolds (Re) se define como: $\Re=\frac{\omega r_2^2}{\nu}$. Para el sistema con impulsores de flujo axial (±30°) las condiciones de frontera se esbozan de manera equivalente a las de los impulsores de disco, a

diferencia de que se le asigna la condición de no deslizamiento y la expresión v=ωr a la superficie de los álabes de los impulsores

7.3 Solución numérica

La solución de las ecuaciones de continuidad y momentum (1) (2), (3) y (4), junto con las condiciones de frontera (5) a (9), se consiguió al emplear el método numérico del elemento finito, a través del software COMSOL MULTIPHYSICS. El procedimiento fue el siguiente [11]:

a) Se selecciona en el software el entorno gráfico de los casos a estudiar. En este caso fue el de tres dimensiones, 3D.

b) Se dibujan las geometrías a analizar y se generan los elementos de los modelos. Para este caso se dibujó un cilindro de 4.5 cm de radio, 9 cm de parte recta y 3 cm de fondo, una flecha para sujetar los impulsores de 0.5 cm de radio por 9.5 cm de longitud. Un impulsor de disco de 2 cm de radio por 0.5 cm de espesor. Un impulsor de flujo axial de 2 cm de radio proyectado con tres álabes rectos de 0.5 cm de altura por 0.1 cm de espesor. Los álabes de los impulsores de flujo axial se dibujaron con una inclinación de ±30° respecto al eje vertical de la flecha. En los sistemas con impulsor de disco y de flujo axial se generaron 211,000 y 243,000 elementos, respectivamente. Se hizo un análisis de independencia de malla al analizar los resultados de la velocidad del flujo con diferentes simulaciones. Se determinó que para una malla más fina que la construida, los valores de la velocidad del flujo son prácticamente los mismos, por lo que la malla elegida fue la correcta.

c) Se introduce al software el valor de las propiedades termofísicas del agua cuyas propiedades permanecen constantes: viscosidad dinámica (μ), densidad (ρ), calor específico (C), coeficiente de expansión volumétrico (β) y conductividad térmica (k). La presión se maneja con el algoritmo de relajación (TDMA) y se utiliza el modelo k-ε estándar, debido a que contempla números de Reynolds altos y supone tanto la viscosidad turbulenta como isotrópica.

d) Se introducen las condiciones de frontera y se da el valor de la velocidad angular a la que va a girar la flecha y los impulsores, en este caso 13.61 rad/s en sentido horario.

e) Se efectúan las simulaciones de los modelos hasta obtener su convergencia. De los resultados obtenidos se exportan las magnitudes de los campos de velocidad ($\vec{V}$) y de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w).

4 Resultados y discusión

Una vez elaborada la programación de los modelos se procedió a correr el programa. Para los dos casos en estudio se empleó agua como fluido de trabajo; al conjuntar la geometría de los sistemas se obtuvo un número de Reynolds de 2.17×10^4. Los arreglos se dimensionaron de la siguiente manera: r_1=0.5 cm, r_2=2 cm, r_3=4.5 cm, r_4=4.88 cm, z_1=3 cm, z_2=2.5 cm, z_3=12 cm, z_4=4.5 cm, z_5=7 cm, z_6=7.5 cm, n=3 álabes, ángulo de inclinación de los álabes ±30° y ω=13.61 rad/s, giro en sentido horario.

Los campos de velocidad ($\vec{V}$) para los depósitos con impulsores de disco y de flujo axial (±30°) se muestran en las Figs. 4 y 5, respectivamente. En ellas se han resaltado algunos valores de la velocidad para ciertos puntos de interés, con el fin de hacer una

comparación del desempeño del flujo. Cabe señalar que se está considerando la dirección del flujo positiva en sentido horario (+) y negativa en sentido anti horario (-).

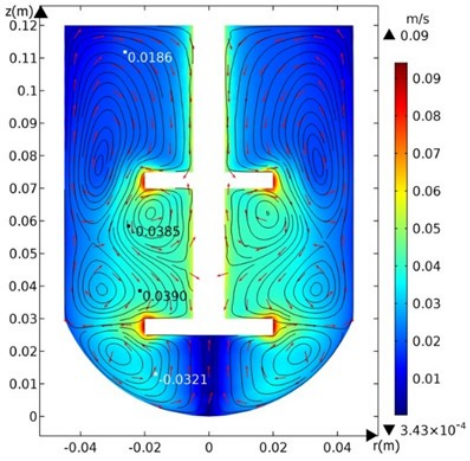


Figura 4 Campo de velocidades ($\vec{V}$) para modelo con impulsores de disco

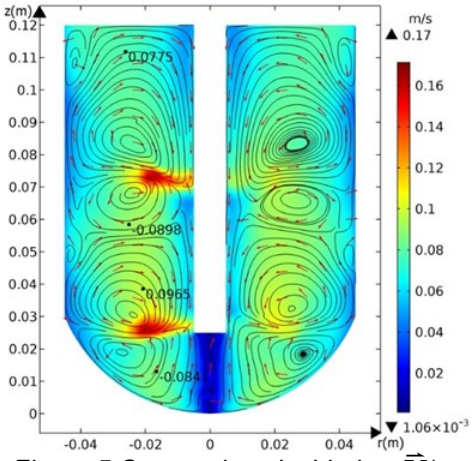


*Figura **5** Campo de velocidades ($\vec{V}$) para modelo con impulsores de flujo axial*

En el modelo con impulsores de disco, Fig. 4, se observa que el fluido es lanzado por los impulsores hacia las paredes del contenedor. En la parte superior izquierda del tanque se aprecia un vórtice de tamaño considerable que gira en sentido horario y que es generado por el disco de arriba. En la zona comprendida entre los dos discos y de lado izquierdo del sistema, se presentan dos vórtices pequeños. Finalmente, en la región que está debajo del impulsor inferior se observa un vórtice de mediana magnitud que abarca hasta el fondo del recipiente, éste gira en sentido anti horario. El campo de velocidades muestra que en las proximidades de la flecha y de los discos se presentan los valores más altos de la velocidad y que lejos de los mismos su intensidad va disminuyendo. Las magnitudes que toma el vector velocidad ($\vec{V}$) en los puntos seleccionados son: +0.0186, -0.0385, +0.039 y -0.0321 m/s. En el modelo con impulsores de flujo axial descendente (+30°) y ascendente (-30°), Fig. 5, se aprecia que el comportamiento es similar al anterior, pero con valores de velocidad mayores. Las magnitudes que toma el vector velocidad ($\vec{V}$) en los puntos seleccionados son: +0.0775, -0.0898, +0.0965 y -0.0841 m/s. A manera de resumen, en la Tabla 2 se muestran los valores de la velocidad ($\vec{V}$) en los puntos seleccionados para los dos modelos.

Tabla 2 Valores del vector velocidad ($\vec{V}$) (m/s)

Modelo impulsores de disco	Modelo impulsores de flujo axial
0.0186	0.0775
-0.0385	-0.0898
0.0390	0.0965
-0.0321	-0.0841

Comparando los resultados de los campos de velocidad de los modelos con impulsor de flujo axial (±30°) respecto al de disco, se encontró que el valor de la

velocidad en los puntos seleccionados se incrementó: 3.16, 1.33, 1.47 y 1.61 veces. Con base a los resultados anteriores se puede afirmar el impulsor de arriba favoreció el flujo hacia la parte superior del depósito y el de abajo hacia la parte inferior del mismo.

Para hacer un análisis más preciso del movimiento del fluido en el interior de los sistemas, se hicieron gráficas de las componentes de velocidad radial (u) y axial (w) en cuatro posiciones de interés: m1, m2, m3 y m4, Fig. 1. El comportamiento de la componente de velocidad radial (u), variando la coordenada "z", para la referencia m_1=2 cm y para el modelo con impulsores de disco y de flujo axial, se muestra en la Fig. 6.

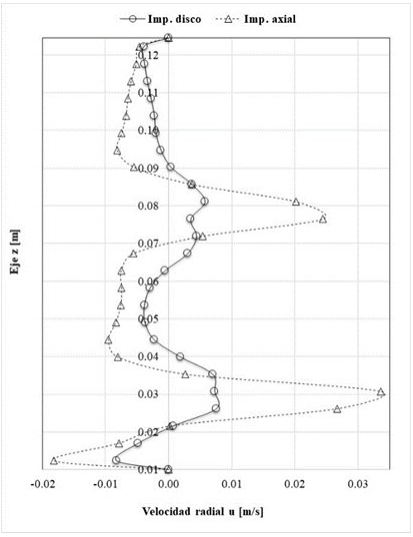


Figura 6. Velocidad radial (u) en m1

En la curva de los impulsores de disco se observa que la velocidad comienza en cero en el fondo del tanque. A continuación, se aprecia que el flujo se dirige hacia el eje del cilindro, esto se advierte por el signo negativo de la velocidad. Se observa que su magnitud va aumentando hasta un máximo negativo de -8.27×10^{-3} m/s y de allí comienza a disminuir su valor hasta cambiar el sentido del flujo. Ahora el fluido se dirige hacia la pared del recipiente, esto se aprecia por el signo positivo de la velocidad. Su magnitud comienza a aumentar hasta un máximo positivo de $+7.55 \times 10^{-3}$ m/s. Este comportamiento, en el que se presenta una velocidad máxima negativa y otra positiva, se debe al vórtice que se genera en la parte inferior del disco cercano al fondo. En la zona comprendida entre los discos inferior y superior se advierte que el fluido retoma el sentido del movimiento hacia la pared del depósito, posteriormente hacia el eje del sistema y nuevamente hacia la pared del tanque, este último motivado por el disco superior. Los valores máximos que se observan son: -3.82×10^{-3} y $+5.75 \times 10^{-3}$ m/s. Para el área comprendida entre el disco superior y la tapa del recipiente se ve que el flujo retoma el movimiento hacia la pared del cilindro, posteriormente hacia el eje del sistema y finalmente la velocidad axial se hace cero en la frontera superior. La magnitud máxima negativa que se presenta en esta zona es de -3.92×10^{-3} m/s. Para el caso de los impulsores de flujo axial descendente (+30°) y ascendente (-30°), se aprecia el mismo comportamiento, pero con valores más altos. Se nota claramente que la velocidad radial se incrementa a lo largo de la coordenada vertical, en mayor medida en

las cercanías de ambos impulsores. En la Tabla 3 se muestran las magnitudes máximas y mínimas de la componente de velocidad radial para los dos modelos.

Tabla 3 Valores máximos y mínimos de la componente de velocidad radial (u) en m1

Impulsor	$u_{máx}$ (m/s)
Disco	$-8.27x10^{-3}$, $+7.55x10^{-3}$, $-3.82x10^{-3}$, $+5.75x10^{-3}$,$-3.92x10^{-3}$
Flujo axial (±30°)	$-18.20x10^{-3}$, $+33.61x10^{-3}$,$-9.55x10^{-3}$, $+24.45x10^{-3}$, $-8.16x10^{-3}$

Comparando los resultados del sistema con impulsores de flujo axial (±30°), respecto a los de disco, se encontró que la componente de velocidad radial positiva y negativa promedio aumentó: 3.36 y 1.24 veces, respectivamente.

El comportamiento de la componente de velocidad axial (w), variando la coordenada "r", en la posición de referencia m_2=1.25 cm y para el arreglo con impulsores de disco y de flujo axial, se observa en la Fig. 7. Para el modelo con impulsores de disco, la curva comienza en cero sobre la pared izquierda del fondo del depósito. Posteriormente, se aprecia que el fluido se dirige hacia el fondo del tanque. Se observa que su valor se va incrementando hasta un máximo negativo de $-6.59x10^{-3}$ m/s y de allí comienza a disminuir su magnitud hasta cambiar el sentido del flujo. Ahora el fluido se dirige hacia la tapa del contenedor. Su valor comienza a aumentar hasta un máximo positivo de $+5.48x10^{-3}$ m/s. Finalmente su intensidad va disminuyendo nuevamente hasta llegar al eje del cilindro con un valor de $+1.77x10^{-3}$ m/s.

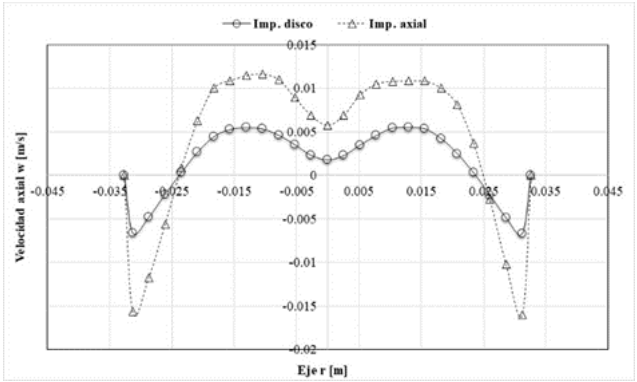


Figura 7. Velocidad axial (w) en m2

Para el modelo con impulsores de flujo axial descendente (+30°) y ascendente (-30°), se tiene el mismo comportamiento, pero con mayores magnitudes. Esto indica que el impulsor de flujo axial descendente (+30°) favorece en esta zona el desarrollo de la velocidad vertical. En la Tabla 4 se muestran las magnitudes máximas y mínimas de la componente de velocidad axial de lado izquierdo del eje del cilindro y para los dos modelos. Al comparar los resultados del recipiente con impulsores de flujo axial (±30°), respecto a los de disco, se encontró que la componente de velocidad axial negativa y positiva aumentó en promedio: 1.38 y 1.05 veces, respectivamente.

Tabla 4 Valores máximos y mínimos de la componente de velocidad axial (w) en m2

Impulsor	$w_{máx}$ (m/s)

Disco	$-6.59x10^{-3}$, $+5.48x10^{-3}$, $+1.77x10^{-3}$
Flujo axial (±30°)	$-15.62x10^{-3}$, $+11.64x10^{-3}$, $+5.76x10^{-3}$

Otro análisis que se hizo fue el de la componente de velocidad axial (w) pero en el punto medio entre el impulsor inferior y superior, Fig. 8, y entre el impulsor superior y la tapa del depósito, Fig. 9, es decir en la posición m_3=3.75 y m_4=4.75 cm, respectivamente, Fig. 1. En las curvas del impulsor de disco se observa que la velocidad vertical toma el valor de cero sobre la pared izquierda del tanque, posteriormente se aprecia que el fluido se mueve hacia la parte superior del cilindro, esto se advierte por el signo positivo de la velocidad, su magnitud se va incrementando hasta un máximo positivo de $2.83x10^{-3}$ y $6.08x10^{-3}$ m/s, respectivamente. De allí comienza a disminuir su valor hasta presentarse un cambio en la dirección del flujo, ahora el fluido se mueve hacia el fondo del recipiente, esto se nota por el signo negativo de la velocidad. Su magnitud va disminuyendo hasta un máximo negativo de $-1.99x10^{-3}$ y $-7.19x10^{-3}$ m/s, respectivamente. Finalmente, la intensidad de la velocidad vertical va aumentando hasta cero, al llegar a la pared izquierda de la flecha. Comparando ambas gráficas se observa que la componente de velocidad axial presenta valores mayores en la parte superior del depósito (m4), contrastada con la zona que hay entre los impulsores inferior y superior (m3). Esto es debido a que en la parte superior no se tiene otro flujo que se contraponga a su movimiento, solo influencia de la tapa rígida.

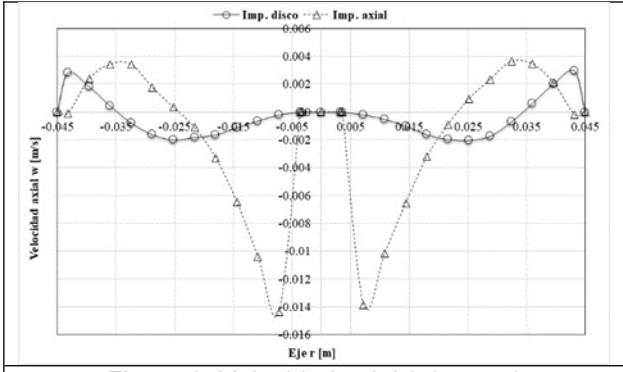


Figura 8. Velocidad axial (w) en m3

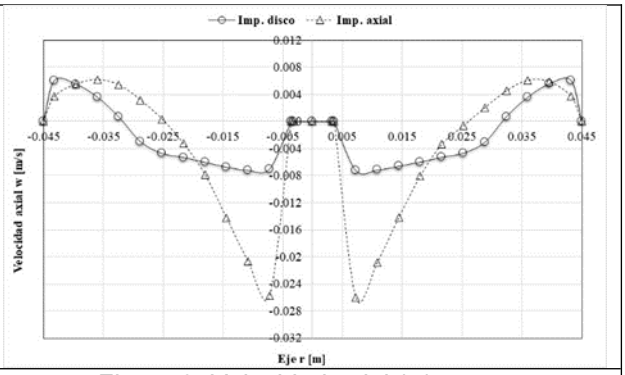


Figura 9. Velocidad axial (w) en m4

Para el modelo con impulsores de flujo axial descendente (+30°) y ascendente (-30°), se presenta el mismo comportamiento, pero con magnitudes mayores. Esto nuevamente corrobora que los impulsores de flujo axial contribuyen a beneficiar el movimiento del fluido en la dirección vertical. En la Tablas 5 se muestran los valores máximos y mínimos de la componente de velocidad axial, de lado izquierdo del eje del cilindro, para las dos posiciones de interés (m3 y m4) y para los dos tipos de impulsor.

Tabla 5 Valores máximos y mínimos de la componente de velocidad axial (w) en m3 y m4

Impulsor	**$w_{máx}$ (m/s) en m3**	**$w_{máx}$ (m/s) en m4**

Disco	$2.83x10^{-3}$, $-1.99x10^{-3}$	$6.08x10^{-3}$, $-7.19x10^{-3}$
Flujo axial (±30°)	$3.44x10^{-3}$, $-14.36x10^{-3}$	$6.19x10^{-3}$, $-25.76x10^{-3}$

Haciendo una comparación de los resultados del sistema con impulsores de flujo axial (±30°), respecto al de disco, se encontró que la componente de velocidad axial positiva y negativa aumentó: 0.21 y 6.21 veces, para la posición m3, y 0.02 y 2.58 veces, para la posición m4, respectivamente. Los valores de la velocidad vertical señalan que en la zona comprendida entre el impulsor superior y la tapa del depósito se encuentran las magnitudes más altas, lo cual es generado por el impulsor de flujo axial ascendente (-30°).

5 Conclusiones

En este trabajo se ha analizado el movimiento de un fluido dentro de un tanque cilíndrico que es promovido por la rotación de un eje que tiene: en un caso dos impulsores de disco y en otro caso dos impulsores de flujo axial, uno descendente (+30°) y otro ascendente (-30°). El método numérico y la metodología propuesta para la solución fueron adecuados, pues permitieron obtener los campos del vector velocidad ($\vec{V}$) de los dos arreglos, así como el comportamiento de la velocidad radial (u) y axial (w) a lo largo del recipiente, encontrándose concordancia con resultados de la literatura. En el análisis del campo de velocidades, de la componente de velocidad radial para la posición m1, y de la componente de velocidad axial para las posiciones m2, m3 y m4, se determinó que el modelo con impulsores de flujo axial generó valores más altos de velocidad, comparado con los impulsores de disco. También se concluye, con base a los resultados, que al colocar los impulsores de flujo axial descendente y ascendente se beneficia el movimiento del fluido en la dirección vertical.

6 Bibliografía

1. Uribe A. R., Rivera R., Aguilera A. F. y Murrieta E., Agitación y mezclado, Revista Enlace Químico, Univerisdad de Guanajuato, Vol. 4, No. 1, 2012.
2. Geankoplis C. J., Procesos de transporte y principios de procesos de separación, 4ª ed., México, CECSA, 2006.
3. Pao H-P, Numerical solution of the Navier Stokes equations for flows in the disk-cylinder system, Phys. Fluids, 15 (1):4-11, 1972.
4. Bertelá, Gory F., Laminar flow in a cylindrical container with a rotating cover, J. Fluids Eng., 104 (1):31-39. doi:10.1115/1.3240849, 1982.
5. Khalili A., Adabala R. R., Rath H. J., Flow induced by an asymmetrically placed disk rotating coaxially inside a cylindrical casing, Acta Mechanica, Springer-Verlag, pp 9-19. Vol 113, 1995.
6. Yu P., Lee T. S., Zeng Y., Low H. T., Characterization of flow behavior in an enclosed cylinder with a partially rotating end wall, Physics of fluids 19, 057104, doi: 10.1063/1.2731420, 2007.
7. Achouri R., Mokni I., Mhiri H. and Bournot P., A 3D CFD simulation of a self inducing Pitched Blade Turbine Downflow, Energy Conversion and Management, Vol. 64, pp. 633-641, 2012.
8. H. Ameur, Mixing of complex fluids with flat and pitched bladed impellers: Effect of blade attack angle and shear-thinning behaviour, Food and bioproducts processing, pp. 71–77, doi 10.1016/j.fbp.2016.04.004, 2016.

9. Landau y Lisfshitz, Fluids Mechanics, Vol. 6, Pergamon Press., 1982.
10. Tijonov A. N., Samarsky A. A., Ecuaciones de la física matemática, Edit. MIR, Moscú, pp 1-29, 1980.
11. Royer, Pryor W., PHD, Multiphysics Modeling Using Comsol, Phys. Fluids, Edit. Jones and Bartlett Publishers, 2011.

Comparación del desempeño termohidráulico de intercambiadores de calor de tubo doble con aletas longitudinales y helicoidales

Grande, V. F.[1], Lizardi, R. A.[1], López, C. R.[1], Terres, P. H.[1], Chávez, S. S.[1],

Mérida, S. G. A.[1], Lara, V. A.[1]

[1]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa Tamaulipas, Alcaldía Azcapotzalco, C. P. 02200, Ciudad de México, México

francisco.grande.v@gmail.com, arlr@azc.uam.mx, rlc@azc.uam.mx, tph@azc.uam.mx, scs@azc.uam.mx, guillermomerida@live.com.mx, arlv@azc.uam.mx

1. Resumen

Se presenta el estudio teórico y numérico de tres intercambiadores de calor de tubo doble. El primer dispositivo posee un tubo liso en el espacio anular; el segundo y tercero poseen un tubo con aletas longitudinales y helicoidales. Se comparó el desempeño térmico del segundo y tercer dispositivo respecto al primero para determinar la mejora en la tasa de transferencia de calor al colocar los diferentes tipos de aletas. El estudio se realizó mediante simulación numérica empleando el método del volumen finito. Los intercambiadores de calor fueron simulados con las mismas condiciones de caudal másico y en configuración a contraflujo. Se determinó que la temperatura de salida del fluido caliente en el segundo y tercer dispositivo se redujo en 9.46% y 7.00%, respectivamente. La tasa de transferencia de calor se incrementó en un 162% y 136%, respectivamente.

2. Introducción

Un intercambiador de calor es un dispositivo utilizado para transferir energía térmica entre dos o más fluidos, entre una superficie sólida y un fluido, o entre partículas sólidas y un fluido, a diferentes temperaturas y en contacto térmico. Los fluidos están separados por una superficie de transferencia de calor, e idealmente no se mezclan ni gotean [1]. En aplicaciones industriales se emplea el contacto térmico entre

dos fluidos como mecanismo de enfriamiento de un fluido de mayor temperatura, -denominado fluido caliente-, en tanto que el otro fluido a menor temperatura -denominado frío- absorbe la energía térmica del fluido caliente [2]. Un tipo de intercambiador de calor empleado en la industria química, de alimentos, petróleo y gas es el intercambiador de calor de tubo doble (ICTD). Es un intercambiador ampliamente utilizado debido a su bajo costo de mantenimiento y diseño. En un ICTD uno de los fluidos fluye por el tubo interior, en tanto que el otro lo hace por el espacio anular entre los dos tubos. Los flujos pueden tener diferentes configuraciones como son: flujo en paralelo y a contracorriente. En el primer caso, ambos fluidos fluyen en la misma dirección, mientras que el último caso los fluidos fluyen en una dirección opuesta. En el diseño de un ICTD siempre se busca aumentar la tasa de transferencia de calor reduciendo el costo y tamaño del dispositivo, de modo que para incrementar el área de transferencia de calor el tubo interior puede tener aletas. Las superficies aletadas se emplean cuando una corriente de fluido está a una presión más alta o tiene un coeficiente de transferencia de calor significativamente más alto en comparación con la otra corriente de fluido. Los ICTD's más comunes son el ICTD de tubo liso (ICTDTL), el ICTD de aletas longitudinales (ICTDAL) y el ICTD con aleta helicoidal (ICTDAH) [1] [2].

Trabajar en el diseño de un ICTD eficiente y confiable requiere emplear procedimientos como el método de diferencia media logarítmica (LMTD) o el método del número de unidades de transferencia de calor (NTU) [3]. Estos métodos tienen algunos inconvenientes, ya que se requieren realizar iteraciones y es necesario un prototipo para implementar el diseño. Sin embargo, la disponibilidad de microprocesadores de alto rendimiento ha permitido el uso de la mecánica de fluidos computacional (CFD) como herramienta de diseño. CFD es un método utilizado para encontrar soluciones numéricas con respecto a la distribución de presión, gradientes de temperatura, parámetros de flujo y similares, en un tiempo más corto y a un menor costo debido a que se reduce el trabajo experimental. Resulta útil para diseñar un sistema de intercambiador de calor desde cero, así como para la resolución de problemas de optimización, sugiriendo modificaciones de diseño [4].

Algunos trabajos reportados en la literatura que abordan el problema de mejora del diseño y tasa de transferencia de calor en los ICTD's son: Omidi, *et al.* [5] ellos realizaron la revisión y recopilación de la literatura sobre los métodos de mejora de la tasa de transferencia de calor y procedimientos de desarrollo por los que ha pasado el ICTD. Muestran la recopilación de los métodos pasivos, activos y compuestos, de los cuales, los métodos pasivos han tenido mayor atención, pues en los métodos pasivos no se utiliza una fuerza externa para mejorar la transferencia de calor e incluye modificaciones geométricas de los tubos, así como la incorporación de aletas y deflectores. Se concluye que, para el caso de los métodos pasivos, en algunos ICTD la tasa de transferencia de calor aumentó aproximadamente un 400%, mientras que la mayor caída de presión fue del 1000% en comparación con el ICTDTL. Kumar, *et al.* [6] realizaron el estudio numérico de un ICTD incorporando aletas longitudinales en el tubo interior. El desempeño del proceso de transferencia de calor es determinado para tres diferentes perfiles de aletas rectangulares, parabólicas y triangulares. Los resultados indicaron que existe una mejora en la tasa de transferencia de calor para un tubo con aletas en comparación con un tubo liso. Entre las diferentes configuraciones, el tubo con aletas de perfil rectangular mostró una mejora sobre los tubos con las aletas de

perfil parabólico y triangular, de modo que para un flujo constante del líquido caliente de 0.02 kg/s y un flujo variable del líquido frio, el tubo con aletas de perfil rectangular mostró una mejora de 2% y 5% con respecto al tubo con aletas de perfil triangular y parabólico, respectivamente. Las aletas con perfil parabólico mostraron una caída de presión mínima y se redujeron en un 38% y 65% en comparación con el tubo aletado triangular y rectangular. Aslam Bhutta *et al.* [4] realizaron una revisión de la literatura sobre las aplicaciones de CFD en el campo de los intercambiadores de calor. Determinaron que se ha empleado CFD en varios tipos de intercambiadores de calor para analizar algunos problemas como: mala distribución del flujo de fluido, ensuciamiento, caída de presión y análisis térmico en la fase de diseño y optimización. Se determinó que las simulaciones generalmente dan resultados que concuerdan con los estudios experimentales que van del 2% al 10%, mientras que, en algunos casos excepcionales, varían hasta el 36%. El Maakoul, *et al.* [7] realizaron el estudio numérico de un ICTDAH agua-agua. Se compararon las configuraciones de la aleta helicoidal para diferentes espacios entre aleta que varían de 0.1m a 0.025m. Fueron analizadas las características del flujo del fluido en el lado del espacio anular y la tasa de trasferencia de calor. Se determinó que para un espacio de 0.025 m la trayectoria del fluido anular es más del doble que la trayectoria para un espacio de 0.1 m. El coeficiente global de transferencia de calor y la caída de presión en el espacio anular aumentan con los incrementos del flujo másico y con las disminuciones en el espacio de aleta. Para un espacio de aleta 0.025 m, el coeficiente global de transferencia de calor y la caída de presión tuvieron un incremento promedio del 45% y 2100% respecto a un ICTDTL con las mismas dimensiones.

En este trabajo se realiza una comparación teórica de un ICTDTL y numérica de los intercambiadores de calor ICTDAL e ICTDAH, agua-agua, en configuración a contraflujo y para condiciones de flujo de masa variable para el fluido frío. Para ello se comparó el desempeño termohidráulico del ICTDAL e ICTDAH respecto al ICTDTL. Se determinó la tasa de transferencia de calor y las temperaturas de salida de los fluidos a partir de las temperaturas y flujos de masa de entrada conocidas y dimensiones geométricas especificadas.

2.1 Nomenclatura

Tabla 1. Nomenclatura

Símbolo	**Descripción**	**Unidad**
K	Energía cinética turbulenta	m^2/s^2
K	Conductividad térmica	W/m K
ε	Razón de disipación turbulenta	m^2/s^3
μ_T	Viscosidad turbulenta	$Pa \cdot s$
P	Densidad	kg/m^3

Símbolo	Descripción	Unidad
U	Vector velocidad	m/s
M	Viscosidad dinámica	kg/m s
Q	Flujo de calor por conducción	W/m^2
q_r	Flujo de calor por radiación	W/m^2
Qv	Fuente de calor contenida	W/m^3
Q	Tasa de transferencia de calor	W
U	Coeficiente global de transferencia de calor	W/m^2K
C_p	Calor específico	J/kg·K
T	Tensor de esfuerzos viscosos	Pa
F	Vector de fuerza del elemento	N/m^3
$\dot{m}$	Flujo másico	kg/s
A_s	Área de la sección anular	m^2
A_i	Área superficial del tubo interior	m^2
D_h	Diámetro hidráulico	m
T	Temperatura	K
v_m	Velocidad medía en el espacio anular	m/s
f	Factor de fricción	-
Re	Número de Reynolds	-

Tabla 2. Subíndices

Prefijo	Descripción	Prefijo	Descripción
c	Agua fría	o	Externo
h	Agua caliente	Cu	Cobre
i	Interno		

3. Planteamiento y solución del problema

3.1 Modelos físicos

Los modelos de ICTDTL, ICTDAL e ICTDAH por simular poseen las mismas longitudes y diámetros, cambiando únicamente la geometría del tubo aletado. Esto asegura la obtención de resultados consistentes, Figura 1a y 1b. Los intercambiadores de calor se conforman de un tubo exterior con conexiones tipo T acopladas en sus extremos y un tubo interior que sobresale. La longitud del tubo exterior con las conexiones es de $L_1 = 1470\,mm$ y del tubo interior es $L_2 = 1550\,mm$. La longitud entre los centros de la entrada y salida de la coraza es $L_3 = 1298\,mm$. El diámetro externo del tubo interior es de $D_1 = 28.57\,mm$. El diámetro interno del tubo exterior es $D_2 = 72.92\,mm$ y el diámetro de las conexiones tipo T son igual al diámetro del tubo exterior. Las entradas y salidas tienen el mismo diámetro $D_3 = 28.57\,mm$. Además, estas sobresalen una longitud de $L_5 = 40\,mm$. En el ICTDTL, el tubo interior es totalmente liso. El ICTDAL posee 16 aletas de perfil rectangular con longitud $L_4 = 1000\,mm$, una altura $L_6 = 15\,mm$ y distribuidas radialmente con un ángulo $\theta = 22.5°$, Figura 1c. El ICTDAH posee una aleta helicoidal cuya longitud es igual a las aletas longitudinales $L_4 = 1000\,mm$, posee un paso $L_7 = 25\,mm$ y una altura $L_8 = 15\,mm$, Figura 1d. Para las tres configuraciones, el espesor del tubo interior es $e_1 = 1.65\,mm$ y las aletas $e_2 = 0.651\,mm$. El material de la coraza, el tubo interior y las aletas es de acero, cobre y aluminio, respectivamente. La conductividad térmica del tubo de cobre es de $\kappa_{Cu} = 339\,W/mK$ y del aluminio de $\kappa_{Al} = 137\,W/mK$.

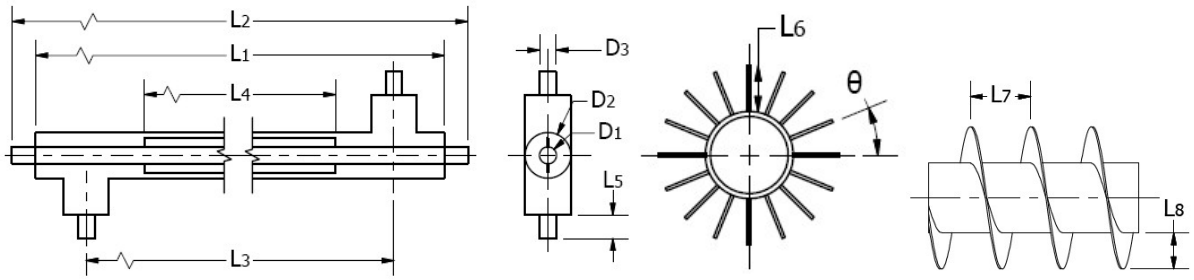


Figura 1. Cotas del intercambiador de calor de tubo doble: (a) vista frontal, (b)vista lateral, (c) tubo interior con aletas longitudinales y (d) tubo interior con aleta helicoidal

Los ICTDs son sistemas agua-agua en configuración a contraflujo. El agua caliente ingresa al tubo interior con un flujo másico $\dot{m}_h$ y una temperatura $T_{h,i}$. El agua fría ingresa al espacio anular con un flujo másico $\dot{m}_c$ y una temperatura $T_{c,i}$, Figura 2.

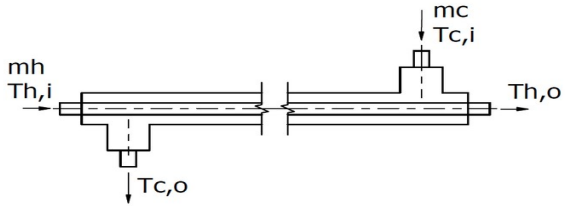


Figura 2. Nomenclatura en el intercambiador de calor de tubo doble

3.2 Planteamiento matemático

En ambos arreglos se consideran las propiedades físicas del agua como constantes y como fluido viscoso e incompresible. El proceso de transferencia de calor se considera en estado permanente. Los rangos de los números de Reynolds van desde 800 hasta 4100 para las diferentes velocidades de flujo estudiadas. El tubo exterior del intercambiador de calor se considera como adiabático, de modo que solo existe transferencia de calor entre el agua caliente y el agua fría. No se consideran el efecto de incrustación y ensuciamiento. El estudio del modelo hidrodinámico se logró al emplear el método numérico de volumen finito, a través del software COMSOL Multiphysics. Este modelo se basa en la solución de las ecuaciones que se describen a continuación:

3.2.1 Modelo de turbulencia realizable $k-\varepsilon$

El modelo introduce dos ecuaciones de transporte y dos variables dependientes: la energía cinética turbulenta, k, y la razón de disipación turbulenta, ε, [8]. La viscosidad turbulenta se modela como:

$$\mu_T = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \tag{1}$$

La ecuación de transporte para k, es:

$$\rho \frac{\partial k}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla k = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + P_k - \rho \varepsilon \tag{2}$$

Donde el término de producción es:

$$P_k = \mu_T \left(\nabla u : \left(\nabla u + (\nabla u)^T \right) - \frac{2}{3} (\nabla \cdot u)^2 \right) - \frac{2}{3} \rho k \nabla \cdot u \tag{3}$$

La ecuación de transporte para ε, es:

$$\rho \frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + \rho u \cdot \nabla \varepsilon = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_T}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{\varepsilon 1} \frac{\varepsilon}{k} P_k - C_{\varepsilon 2} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \tag{4}$$

Las constantes empíricas del modelo de turbulencia realizable $k-\varepsilon$, son:

$$C_{\varepsilon 1} = 1.44;\ C_{\varepsilon 2} = 1.9;\ \sigma_k = 1;\ \sigma_\varepsilon = 1.2$$

El modelo realizable $k-\varepsilon$ proporciona un rendimiento satisfactorio para flujos turbulentos, flujos en rotación, efecto de capas límite bajo fuerte gradiente adverso de presión y recirculación [9].

3.2.2 Transferencia de calor en fluidos

La interfaz de transferencia de calor en fluidos se resuelve con la siguiente ecuación:

$$\rho C_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\cdot\nabla T\right)+\nabla\cdot(q+q_r)=-\left.\frac{T\,\partial p}{\rho\,\partial T}\right|_p\left(\frac{\partial p}{\partial t}+u\cdot\nabla p\right)+\tau:\nabla u+Q_v \tag{5}$$

Donde C_p define la cantidad de energía térmica requerida para producir un cambio de temperatura por unidad de masa, T es la temperatura absoluta, q es el flujo de calor por conducción y τ es el tensor de esfuerzos viscosos [10].

3.2.3 Transferencia de calor conjugado y flujo no isotérmico

Este módulo de COMSOL incluye la multifísica predefinida de flujo no isotérmico para simular sistemas en los que la densidad varía con la temperatura. Esta interfaz contiene la formulación completa de las ecuaciones de momento y continuidad [8]:

$$\frac{\partial p}{\partial t}+\nabla\cdot(\rho u)=0 \tag{6}$$

$$\rho\frac{\partial u}{\partial t}+\rho u\cdot\nabla u=-\nabla p+\nabla\cdot\left(\mu\left(\nabla u+(\nabla u)^T\right)-\frac{2}{3}\mu(\nabla\cdot u)I\right)+F$$

3.2.4 Ecuaciones para el análisis teórico del ICTDTL

La velocidad media en el espacio anular se define como:

$$v_m=\frac{\dot{m}_c}{\rho_c A_s} \tag{7}$$

A partir de la velocidad media, el número de Reynolds es determinado por:

$$Re=\frac{v_m p_c D_h}{\mu_c} \tag{8}$$

La tasa de transferencia de calor para el fluido que pasa por el tubo interior (agua caliente) y por el espacio anular (agua fría) es:

$$Q=\dot{m}_h C_{p,h}(T_{h,i}-T_{h,o}) \tag{9}$$

$$Q=\dot{m}_c C_{p,c}(T_{c,o}-T_{c,i})$$

La diferencia de temperatura media logarítmica es:

$$\Delta T_{ml}=\frac{(T_{h,i}-T_{c,o})-(T_{h,o}-T_{c,i})}{\ln[(T_{h,i}-T_{c,o})/(T_{h,o}-T_{c,i}¿} ¿¿ \tag{10}$$

A partir de la diferencia de temperatura media logarítmica y la tasa de transferencia de calor, el coeficiente global de transferencia de calor es:

$$U=\frac{Q}{A_1\Delta T_{ml}} \tag{11}$$

La caída de presión del fluido que pasa por el espacio anular se determina por:

$$\Delta p = f \frac{L_3}{D_3} \frac{\rho v_i^2}{2} \tag{12}$$

Donde *f* es el factor de fricción dado por:

$$f = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2} \tag{13}$$

3.3 Análisis numérico

Para realizar la simulación numérica de los ICTDs, se propusieron dos casos. El primer caso, ICTDTL, se empleó como modelo de referencia para validar la solución numérica por medio de la solución analítica. El segundo caso, el ICTDAL e ICTDAH solo se resolvieron numéricamente. En los dos casos se definieron dos dominios de fluidos y dos fronteras como paredes. Los dominios son el agua en el tubo interior y en el espacio anular, las fronteras son las paredes del tubo exterior, del tubo interior y las aletas. El tubo interior y las aletas fueron definidos con una aproximación térmicamente delgada, especificando el espesor del tubo y aletas. Esto reduce el número de elementos del mallado y proporciona una calidad de elementos homogénea.

Los dominios y fronteras fueron mallados empleando elementos tetraédricos y triangulares. Se analizó la independencia del tamaño de la malla y su relación con los resultados de temperaturas de salida para el ICTDTL. Esta se hizo para un mallado de 93000, 213000 y 308000 elementos. Se encontró que, para los mallados de 213000 y 308000 elementos las temperaturas de salida tienen una diferencia menor del 1%. Considerando los recursos de cómputo disponibles y el tiempo de convergencia de la solución, se eligió el mallado con 213000 elementos.

La condición de no deslizamiento fue aplicada a todas las paredes. La condición de aislamiento térmico fue aplicada a las paredes externas, mientras que la condición de conducción de calor fue definida para el tubo interior y aletas. Esta región es la que ofrece un acoplamiento entre las interfaces de los dominios líquidos. Para las entradas, la condición de entrada de flujo fue definida con la velocidad media y temperatura de entrada y para las salidas se consideró la condición de presión cero, de modo que la caída de presión es igual a la presión de entrada.

4. Resultados y discusión

Para el análisis de los intercambiadores de calor, el flujo másico del agua que pasa por el tubo interior se mantuvo constante a $\dot{m}_h = 0.025 \text{ kg/s}$. El flujo másico del agua que pasa por el espacio anular se varió de $0.049 \text{ kg/s} \leq \dot{m}_c \leq 0.174 \text{ kg/s}$ con pasos de 0.025 kg/s. El número de Reynolds en el lado del tubo exterior estuvo entre el rango de 800-4100, pues se incrementaba al aumentar la velocidad media. El número de Reynolds en el lado del tubo interior se mantuvo entre el rango de 3200-3350 y variaba debido a los cambios de densidad del fluido. Las temperaturas de entrada de ambos fluidos se mantuvieron constantes, siendo $T_{h,i} = 80°\text{C}$ la temperatura del agua que ingresa al tubo interior y $T_{c,i} = 20°\text{C}$ la temperatura del agua que ingresa al espacio anular (Figura 3).

La simulación numérica del ICTDTL fue validada comparando la solución numérica con la solución analítica obtenida a partir de las ecuaciones 7 a 13. Se determinó que

para el coeficiente global de transferencia de calor el error promedio fue de 1.19%, mientras que para las temperaturas de salida del fluido frio y caliente el error fue de 1.95% y 2.87%, respectivamente. Así, el modelo numérico del ICTDTL es válido como modelo de referencia.

La Figura 3 muestra la curva de las temperaturas de salida de los fluidos frío y caliente al variar $\dot{m}_c$ en la simulación numérica. Para los tres tipos de ICTDs al incrementarse el flujo másico $\dot{m}_c$, las temperaturas de salida $T_{h,o}$y $T_{c,o}$ decrecen. Los intercambiadores ICTDAL e ICTDAH generan temperaturas de salida del fluido caliente inferiores respecto a las temperaturas de salida del ICTDTL. De igual forma, las temperaturas de salida del fluido frío son mayores para los ICTDAL e ICTDAH respecto al ICTDTL.

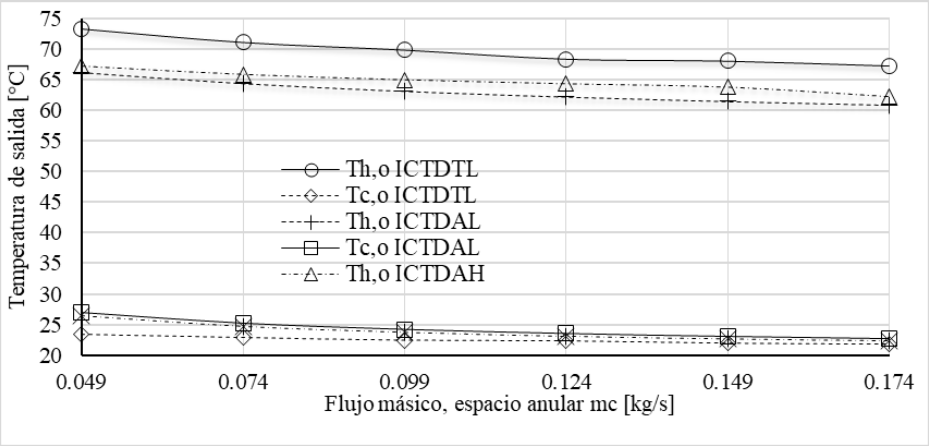


Figura 3. Curvas de temperatura de salida para las configuraciones de flujo

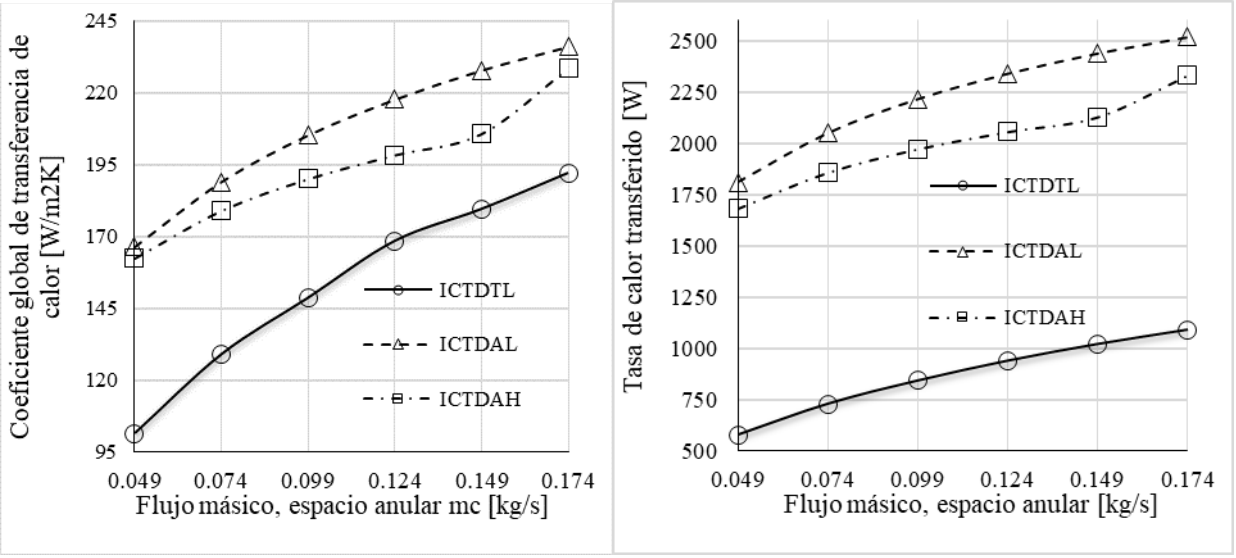
$0.049\ \text{kg/s} \leq \dot{m}_c \leq 0.174\ \text{kg/s}$ *y* $\dot{m}_h$ *constante*

Lo anterior indica que la superficie aletada del tubo interior favorece en el proceso de transferencia de calor entre los fluidos. Comparando el desempeño entre los intercambiadores ICTDAL e ICTDAH –ambos con superficie aletada- el ICDAL tiene una mayor efectividad al obtenerse temperaturas de salida del fluido caliente más bajas. Es decir, el ICTDAL e ICTDAH tienen una reducción promedio del 9.46% y 7.00% en las temperaturas de salida respecto al ICTDTL.

En el caso del flujo másico máximo de 0.174 kg/s, las temperaturas de salida del ICTDTL, ICTDAL e ICTDAH son: 67.2 °C, 60.8 °C y 62.2 °C, para las temperaturas de salida del fluido caliente, y 21.8°, 22.7°C y 22.4°C, para las temperaturas de salida del fluido frío, respectivamente.

La Figura 4a representa la comparación de los resultados numéricos del coeficiente global de transferencia de calor U respecto al área interna del tubo interior. Se observa que en los tres dispositivos dicho coeficiente aumenta a medida que el flujo másico se incrementa, El valor de U del ICTDAL e ICTDAH tuvieron un incremento promedio del 37.9% y 29.6% con respecto al ICTDTL. Dicho incremento indica que las aletas en la superficie externa del tubo interior favorecen la transferencia de calor entre los fluidos. La mejora en el coeficiente global de transferencia de calor también genera

un aumento en la tasa de transferencia de calor. En la Figura 4b se observa que el ICTDTL posee tasa de transferencia de calor por debajo de los valores a los que operan los ICTDAL e ICTDAH. La disposición de aletas mejora significativamente la tasa de transferencia de calor. Así, la tasa de transferencia de calor en los intercambiadores ICTDAL e ICTDAH tiene un incremento promedio del 162% y 136% respecto al ICTDTL.



(a) (b)

Figura 4. (a) Coeficiente global de transferencia de calor respecto al área interna del tubo y (b) tasa de calor transferido para las configuraciones de flujo $0.049\ \text{kg/s} \le \dot{m}_c \le 0.174\ \text{kg/s}$ *y* $\dot{m}_h$ *constante*

Cabe mencionar que la caída de presión Δp en el espacio anular fue evaluada con la diferencia de presiones entre la entrada y salida de los fluidos. A medida que la velocidad de flujo aumenta, la diferencia de presión también lo hace. Se determinó que, para todas las configuraciones de flujo, la caída de presión en el ICTDAL tuvo un incremento del 2.6% respecto al ICTDTL, lo cual se debe a que las aletas longitudinales se encuentran en el mismo sentido del flujo en el espacio anular y no producen alteraciones en las características de dicho flujo. Para el caso del ICTDAH, el aumento de la caída de presión al aumentar el flujo másico no es lineal, pues a diferencia del ICTDAL, la aleta en espiral produce una corriente helicoidal que sigue el perfil de dicha aleta. Esto genera mayor fricción y por lo tanto un incremento en la presión de entrada para que opere en las mismas condiciones de flujo.

5. Conclusiones

El ICTDAL e ICTDAH tuvieron un mejor desempeño termohidráulico que el ICTDTL. La configuración aletada de dichos intercambiadores produjo un aumento en la tasa de transferencia de calor y el coeficiente global de transferencia de calor. El aumento promedio de la tasa de transferencia de calor del ICTDAL e ICTDAH respecto

al ICTDTL fue de 162% y 136% respectivamente. Lo mismo sucedió con el coeficiente global de transferencia de calor respecto al área interna del tubo interior, los cuales tuvieron un aumento promedio de 37.9% y 29.6%, respectivamente. A su vez, las temperaturas de salida del fluido caliente del ICTDAL e ICTDAH fueron en promedio 9.46% y 7.00% menores que las registradas en el ICTDTL. Esto indica que las superficies aletadas favorecieron al proceso de transferencia de calor, de modo que su incorporación mejora el desempeño de un ICTD sin modificar sus características de diseño. Para las condiciones de operación de flujo estudiadas, la temperatura de salida del fluido caliente decreció a medida que el flujo másico del fluido externo (agua fría) aumentó. Al mismo tiempo, la temperatura de salida del agua fría tiende a aumentar. Las temperaturas de salida del fluido caliente más bajas se obtuvieron con el flujo másico de 0.174 kg/s siendo de 67.2 °C, 60.8 °C y 62.2 °C, para los ICTDTL, ICTDAL e ICTDAH, respectivamente. Para el mismo flujo, las temperaturas de salida del fluido frío fueron de 21.8°C, 22.7°C y 22.4°C, respectivamente.

En los tres casos estudiados, se determinó que el dispositivo con menor aumento en la caída de presión respecto al ICTDTL fue el ICTDAL. La caída de presión presentó un incremento del 2.6%, lo que implica que las aletas no alteraron las características del flujo debido a que la disposición de las aletas es en el mismo sentido de flujo que el fluido exterior. Así, no es requerido un aumento en la energía de presión para que el I8CTDAL opere en las mismas condiciones que el ICTDTL. En cuanto al ICTDAH, la caída de presión aumentó exponencialmente a medida que el flujo másico de agua fría se incrementaba, lo cual genera un mayor gasto de energía para el suministro del fluido. Por lo tanto, evaluando todas las características anteriores, el ICTDAL es el dispositivo más adecuado para operar en las condiciones de funcionamiento propuestas sin que esto implique un aumento en la energía y modificaciones en el diseño propuesto.

6. Bibliografía

12. Shah R., Sekuliâc D., “Fundamentals of heat exchanger design”, Hoboken, NJ: John Wiley & Sons, 1-21, 2003.
13. Kuppan T., “Heat exchanger design handbook”, 2nd ed. Boca Raton, FL: CRC Press Taylor & Francis Group, 1-34, 2013.
14. Ozden E., Tari I., Shell side CFD analysis of a small shell-and-tube heat exchanger, Energy Conversion and Management, V. 51, N. 5, 1004-1014, 2010.
15. Aslam Bhutta M., Hayat N., Bashir M., Khan A., Ahmad K., Khan S., CFD applications in various heat exchangers design: A review, Applied Thermal Engineering, V. 32, 1-12, 2012.
16. Omidi M., Farhadi M., Jafari M., A comprehensive review on double pipe heat exchangers, Applied Thermal Engineering, V. 110, 1075-1090, 2017.
17. Kumar S., Karanth K., Murthy K., Numerical study of heat transfer in a finned double pipe heat exchanger, Worl Academis Union, V. 11, N. 1, 43-54, 2015.
18. El Maakoul A., Laknizi A., Saadeddine S., Ben Abdellah A., Meziane M., El Metoui M., Numerical design and investigation of heat transfer enhancement and performance for an annulus with continuous helical baffles in a double-pipe heat exchanger, Energy Conversion and Management, V. 133, 76-86, 2017.
19. CFD Module User's Guide, COMSOL multiphysics, version 5.3a, 2018.
20. Syed K., Ishaq M., Iqbal Z., Hassan A., Numerical study of an innovative design of a finned double-pipe heat exchanger with variable fin-tip thickness, Energy Conv. and Manag., V. 98, 69-80, 2015.

21. Heat Transfer Module User's Guide, COMSOL multiphysics, version 5.3a, 2018.

Modelo para el cálculo del costo beneficio de una regulación del consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono de tractocamiones

Domínguez-Pérez, R.M.,[1] Pantoja-Gallegos, J.L.,[2] Domínguez-Pérez, D.N.,[3] Domínguez-Vergara, N.[2]

[1]Investigador independiente.

[2]Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco.

[3]Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México.

ricardodominguezperez@gmail.com, jpg@correo.azc.uam.mx, dannickfox@gmail.com, ndv@correo.azc.uam.mx

1. Resumen

Es necesario construir modelos para evaluar el costo beneficio de una futura norma de consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero para los vehículos nuevos más pesados de México que son los tractocamiones, porque son los que consumen más combustible y emiten más emisiones de gases de efecto invernadero por unidad que el resto de los vehículos pesados. Es necesaria una norma de eficiencia energética para los tractocamiones nuevos debido a que México importa más del 70% del diésel que se consume en el país y se necesita disminuir su importación, además de que es indispensable disminuir las emisiones de gases de efecto invernadero. En este trabajo se reportan los resultados de un modelo de costo beneficio de introducir tractocamiones nuevos más eficientes al parque vehicular pesado basado en el cálculo del valor presente neto.

2. Introducción

Los tractocamiones son los vehículos que consumen más combustible y emiten más bióxido de carbono por unidad que todos los demás vehículos en el parque vehicular del país. Los

tractocamiones transportan ininterrumpidamente productos alimenticios y otros bienes que son indispensables para la población aun en situaciones de emergencias sanitarias. Un incremento del 1% de producto interno bruto per cápita en un país ocasiona un aumento del 1.07% en las toneladas (tons) por kilómetro (km) de carga transportada en sus carreteras [1]. Los tractocamiones son muy rentables para transportar carga porque consumen (1 litro)/(100 tons km) mientras que cuando se transporta carga con un vehículo de los menos pesados el consumo es de (14.4 litros)/(100 tons km) [1]. Un tractocamión con tráiler que transporta 23 toneladas podría consumir (25 litros/100 km), o sea que tendría un consumo de combustible de 0.25 litros/km, pero si viaja muy cargado su consumo podría aumentar a 40 litros/100km [1], o sea su consumo sería de 0.4 litros/km. Para los tractocamiones más pesados por cada tonelada adicional de carga el consumo aumenta como en (1 litro/100km) [1]. Debido a que México importa más del 70% del diésel que consume es necesaria una disminución del consumo de combustible (diésel) que se puede lograr aumentando la eficiencia energética de los tractocamiones, así como para disminuir las emisiones de bióxido de carbono que contribuyen al calentamiento de la tierra. Por lo anterior es necesario construir modelos para evaluar el costo beneficio de una norma de consumo de combustible y emisiones de bióxido de carbono para los tractocamiones. En este trabajo se presenta un modelo basado en el Valor Presente Neto (VPN), en el que se compara el incremento en el costo de los tractocamiones con el ahorro en el consumo de combustible de vehículos más eficientes.

3. Valor presente neto y tasa de descuento

Supóngase que hoy se realiza una inversión que resultará en entradas o salidas de efectivo en varios puntos del futuro. Un buen inversionista es aquél que determina si el total de estos movimientos de dinero resultarán en un valor mayor a su inversión inicial, de lo contrario, resultaría en una pérdida. El Valor Presente Neto (VPN) es un concepto para englobar la inversión inicial junto con los futuros flujos de efectivo y establecer una medida para el rendimiento al día de hoy para una inversión. La manera en que se comparan los flujos futuros de efectivo contra el gasto al tiempo presente es mediante una tasa de descuento *r*, donde el factor $(1+r)^n$ se le aplicará a todos los flujos de efectivo dependiendo del año en que se realicen. De esta forma, definimos el VPN en la Ecuación 1.

$$VPN = \sum_n \frac{Flujo_n}{(1+r)^n} \qquad (1)$$

En la Ecuación 1, $Flujo_n$ es el flujo de efectivo en el año n y r es la tasa de descuento.

Para el caso de tractocamiones, se utiliza el VPN como medida para saber en qué casos se presentan ganancias al invertir en vehículos eficientes. El objetivo de este modelo es comparar si los ahorros en diésel del vehículo eficiente (la diferencia entre el costo del diésel para el vehículo

convencional y el costo del diésel para operar el vehículo eficiente) será mayor al día de hoy a la prima por adquirir un vehículo eficiente, o sea, el exceso del costo del vehículo eficiente sobre el del vehículo convencional.

Definimos la tasa interna de retorno (ret) como la tasa de descuento tal que el VPN tome el valor de cero, es decir, la inversión no resultará en pérdidas ni ganancias como se muestra en la Ecuación 2.

$$\sum_{n} \frac{Flujo_n}{(1+ret)^n} = 0 \qquad (2)$$

Supongamos que el tractocamión B con consumo de 0.255 litros de diésel por kilómetro recorrido tiene un costo de $3025946.875, contra el tractocamión A con consumo de 0.3 litros de diésel por kilómetro con un costo de $2,800,000. Como se puede observar, el vehículo A es menos eficiente por lo que su costo inicial es menor. Para este modelo, tomaremos en cuenta el desgaste del vehículo, es decir, después de cada año el vehículo consumirá más combustible que el año anterior, aumentando su consumo en 0.1992% cada año. Se supone que en el año 2021 comienzan a operar los vehículos e inicialmente recorren 70000 kilómetros y cada año posterior se reducirá su recorrido en 1,000 km. Se considera el costo de un litro de diésel en $20.50 pesos que se incrementa anualmente en un 3.4%. La Tabla 1 muestra los costos del diésel en los siguientes cinco años detallando el consumo de cada vehículo.

Tabla 1. Costos de operación en 5 años de dos vehículos con eficiencias energéticas diferentes.

Año	Precio diesel	Recorrido km	Vehículo A			Vehículo B			Ahorro
			Consumo (litros/km)	Litros Consumidos	Costo diésel	Consumo (litros/km)	Litros consumidos	Costo diésel	
2021	$20.00	70,000	0.3	21,000.00	$420,000.00	0.255	17,850.00	$357,000.00	$63,000.00
2022	$20.68	69,000	0.3006	20,741.24	$428,928.75	0.2555	17,630.05	$364,589.44	$64,339.31
2023	$21.38	68,000	0.3012	20,481.36	$437,955.30	0.256	17,409.15	$372,262.01	$65,693.30
2024	$22.11	67,000	0.3018	20,220.36	$447,075.11	0.2565	17,187.31	$380,013.84	$67,061.27
2025	$22.86	66,000	0.3024	19,958.24	$456,283.16	0.257	16,964.51	$387,840.69	$68,442.47

Para este ejemplo, la inversión inicial será la diferencia entre el precio de los dos vehículos, siendo de $225,946.875. Los ahorros serán las diferencias entre el costo del diésel para operar el vehículo A contra el del vehículo B. En el cálculo del VPN, la inversión inicial será de -225,946.875 (prima para el vehículo eficiente) y los flujos de efectivo serán los ahorros de cada año. De esta forma, el VPN será como se muestra en la Ecuación 3.

$$VPN = -225{,}946.875 + \frac{63{,}000}{(1+ret)^1} + \frac{64{,}339.31}{(1+ret)^2} + \frac{65{,}693.30}{(1+ret)^3} + \frac{67{,}061.27}{(1+ret)^4} + \frac{68{,}442.47}{(1+ret)^5} \quad (3)$$

Igualando VPN a cero, resolvemos la ecuación para ret y obtenemos ret=13.712%. Concluimos que cualquier tasa de descuento menor a ret resultaría en un VPN positivo, siendo una inversión con ganancias.

La tasa de descuento aplicable para inversiones relativas al ahorro energético se puede determinar mediante el Capital Asset Pricing Model (CAPM), o Modelo de Valuación de Activos de Capital, el cual describe la relación entre el riesgo sistemático y los rendimientos esperados para activos en el mercado. Este modelo es usado extensivamente en las finanzas para valuar activos en el mercado y determinar sus rendimientos esperados tomando en cuenta su nivel de riesgo y costo de capital. Se basa en la premisa que, al tomar un riesgo en el mercado, se compensa con una prima de riesgo, o sea, una posible ganancia obtenida por tomar el riesgo. El modelo CAPM está expresado en la Ecuación 4.

$$E\,R_i = R_f + \beta_i \left(E\,R_m - R_f \right) \quad (4)$$

En la Ecuación 4, $E\,R_i$ son los rendimientos esperados de la inversión, R_f es la tasa libre de riesgo (tasa Cetes en el caso de México), β_i es la beta de la inversión, o sea, la sensibilidad del activo frente a movimientos en el mercado, $E\,R_m$ es el rendimiento esperado del mercado y $\left(E\,R_m - R_f \right)$ la prima de riesgo en el mercado.

Los rendimientos esperados para una inversión dirigida al ahorro de combustible resultarían en la tasa de descuento [2], por lo que el modelo CAPM aplicado a una inversión energética en México sería como se muestra en la Ecuación 5.

$$\text{Tasa de descuento} = r = \text{Tasa Cetes} + \beta \times \text{Prima de Riesgo} \quad (5)$$

El grupo de trabajo que elabore la norma de vehículos pesados deberá realizar un estudio exhaustivo para obtener los insumos de esta fórmula; sin embargo, varios autores han sustentado un rango de valores para la tasa de descuento en automóviles. Busse [3] propone para el caso de Estados Unidos que este rendimiento se encuentra dentro del rango 0% - 20%, mientras Verboven [4] los encuentra dentro del rango 5% - 13% para Europa. Aludiendo a estos resultados, el Ministerio de

Comercio e Industria de Singapur [5] propone un valor de 10% en sus cálculos del VPN aplicable a ahorros derivados de avances en la eficiencia energética de automóviles.

Dado que $r = 10\%$ cae dentro de los rangos propuestos por Verboven y Busse [3] [4], se puede tomar este valor para realizar aproximaciones a los ahorros resultantes en valor presente por la utilización de vehículos eficientes. En este trabajo por lo tanto usamos r=10% que se puede modificar en el futuro al valor que se acuerde en el grupo de trabajo que diseñe la norma.

Así es que el VPN compara un vehículo con otro de mayor eficiencia, trayendo los ahorros a valor presente.

4. Modelo del costo beneficio de un aumento en la eficiencia energética de un tractocamión

Como un vehículo eficiente cuesta más, consideramos que el incremento en el costo de los vehículos pesados aumenta de acuerdo al aumento en su eficiencia energética (disminución del consumo de combustible por kilómetro) como se muestra en la ecuación 6. En esa ecuación P_c, es el precio del vehículo con consumo de combustible c. El consumo de combustible c, se proporciona en litros/km cuando se transporta una carga de 20 tons. P_{c0} es el precio del vehículo que tiene el mayor consumo de combustible $c0$, que es el consumo de referencia (el consumo del vehículo más ineficiente, energéticamente hablando) cuando el vehículo transporta una carga de 20 tons. $c0$ sería el consumo de un vehículo pesado sin que existiera una norma de combustible y c sería el consumo que exigiría una norma de consumo de combustible. Suponemos en este trabajo que la norma establecerá que las pruebas de consumo de combustible de los tractocamiones se realicen con una carga de 20 tons, si no es así los cálculos en el futuro se tendrían que hacer con los datos que se requieran por la norma. En este trabajo, el consumo más ineficiente (más grande) de un vehículo nuevo se toma como 0.3 litros/km, o sea un rendimiento de combustible de 3.333 kilómetros por litro cuando transporta una carga de 20 tons. Usamos supuestos para una norma que todavía no está diseñada pero que antes de implementarla se deben tener las herramientas para calcular el consumo de combustible y el costo beneficio de su implantación. En otro trabajo que se publicará se reporta el modelo para calcular el consumo de combustible de los tractocamiones y en este trabajo se muestra un modelo de costo beneficio de la adquisición de vehículos más eficientes.

El precio de los vehículos depende del paquete tecnológico (o sea las partes del vehículo, que son motor, transmisión, llantas, diferencial, etcétera) que se use para lograr disminuir el consumo de combustible. Los paquetes tecnológicos pueden ser diferentes para lograr el mismo consumo, aunque con precios distintos. Se considera que el precio de toda la unidad de carga (tracto (parte motriz) más el remolque (en el que se deposita la carga) al que denominamos tractocamión) es de $2800000.00 pesos para el vehículo con la eficiencia más baja, o sea el del consumo de combustible más alto que es $c0$. Todos los precios de los vehículos con diferentes consumos se estiman para el año en el que suponemos entrará en operación la norma, que en este trabajo

suponemos que es en el año de 2021, únicamente para mostrar cómo funciona el modelo y porque es más fácil suponer los costos de los tractocamiones y el precio del diésel, debido a que en los pocos años siguientes podría existir una gran turbulencia en la economía del país debido a los estragos del coronavirus.

$$P_c = P_{c0} + \mu * P_{c0} * \left(\frac{c0 - c}{c0} \right) + \alpha * P_{c0} * \left(\frac{c0 - c}{c0} \right)^{\beta} \quad (6)$$

En la Ecuación 6 los dos últimos términos representan el incremento en el costo por la adquisición de un vehículo más eficiente que el que tiene un consumo de $c0$. En la ecuación 6, las variables μ, α yβson parámetros. En este trabajo se considera $\mu = \frac{1}{2}$, es decir que para valores de consumo c cercanos a c0 el aumento en el precio del vehículo más eficiente será la mitad de la disminución relativa del consumo. Si el consumo relativo disminuye en 0.06 (6 por ciento) el incremento en el precio del vehículo será aproximadamente de (0.06/2)*P_{c0}, o sea como del 3% del valor de P_{c0}. Lo anterior es consistente con la relación de los precios de los vehículos pesados con sus consumos de combustible en la norma de Estados Unidos, en la que se tiene que si el consumo de combustible disminuye en un 13% el precio del vehículo se incrementa en alrededor del 6% [6]. Aparte del término lineal agregamos en la ecuación 1 otro término con los parámetros $\alpha = 500$y $\beta = 6$ para modelar que cuando la reducción del consumo de combustible es muy grande el precio aumenta más rápidamente. En todos los cálculos de esta sección, el consumo de combustible de los tractocamiones se considera para una carga de 20 tons.

Se considera que el precio del litro del combustible (diésel) en el año 2021 (t=0) será de $20.50 pesos debido a que se espera que la actividad económica crecerá en el mundo y el precio del barril del petróleo se elevará y por lo tanto subirán los precios de los petrolíferos. Consideramos un aumento del precio del litro del diésel después del año 2021 solamente de acuerdo a la inflación anual, que se considera de 3.4% cada año.

Nuestros cálculos del VPN son para once tractocamiones que se adquieren en el año 2021, con consumos desde c0 (0.3 litros/km) hasta 0.225 litros/km con diferencias en sus consumos de (0.0075 litros/km). Se realiza el cálculo del VPN para varios años de uso de los once vehículos en intervalos de 5 años, comenzando desde el año 2021. Se supone que conforme los vehículos se hacen más viejos aumentan su consumo de combustible en un 0.1992% cada año (o sea que pierden eficiencia energética). Se hace la consideración de que un vehículo nuevo recorre 50000 kilómetros por año en su primer año de uso (en el año 2021), pero que cada año posterior disminuye el kilometraje recorrido en 1000 kilómetros cada año; o sea que conforme el vehículo se va haciendo viejo, se le usa menos.

Para evaluar el costo-beneficio de la adquisición de un tractocamión, con consumo de combustible c, calculamos el Valor Presente Neto (VPN_c), como se muestra en la Ecuación 7 [5], suponiendo que la adquisición del vehículo eficiente se realiza en el año 2021. El VPN_c se calcula para varios años, a 5, 10, 15, 20 y 25 años.

$$VPN_c = \sum_{t=2021}^{t} \left[\frac{\left(Consumo\,diésel_{c0}(t) - Consumo\,diésel_c(t)\right) * P_{diésel}(t)}{(1+r)^{(t-2021)}} \right] - \left(P_c - P_{c0}\right) \quad (7)$$

Donde $Consumo\,diésel_{c0}(t)$ es el consumo de diésel anual durante el año t del vehículo con consumo $c0$. $Consumo\,diésel_c(t)$ es el consumo de diésel anual en el año t del vehículo más eficiente que tiene un consumo de c. $P_{diésel}(t)$, es el precio promedio de un litro de diésel durante el año t. En la ecuación 7, r es la tasa de descuento, que suponemos del 10%, o sea de 0.10.

El consumo de diésel en litros para el vehículo con consumo de combustible inicial c, durante el año t se evalúa como se indica en la ecuación (8).

$$Consumo\,diésel_c(t) = \left[kilometraje\,en\,2021 - 1000(t-2021)\right] km * \left[c * (1 + 0.001992 * (t-2021))\right] \quad (8)$$

De la misma manera el consumo de diésel en litros para el vehículo con consumo de combustible inicial $c0$, durante el año t se evalúa como se indica en la ecuación (9).

$$Consumo\,diésel_{c0}(t) = \left[kilometraje\,en\,2021 - 1000(t-2021)\right] km * \left[c0 * (1 + 0.001992 * (t-2021))\right] \quad (9)$$

En la Tabla 2, se listan todos los parámetros que se usan para el cálculo del VPN_c, para un solo vehículo con consumo de combustible c.

Tabla 2. Variables y valores usados para el cálculo del Valor Presente Neto de un solo vehículo con un consumo de combustible inicial c (año 2021).

Variable	Valor	Variable	Valor

Precio inicial del diésel	$20.5	c mínimo (litros/km)	0.225
Inflación	3.4%	Aumento de consumo anual del vehículo (litros/km)	0.1992%
Precio del tractocamión con, P_{c0}	$ 2800000.00	Kilometraje en 2021 (km)	50000
μ	0.5	Disminución anual del kilometraje (km)	1000
α	500	Año de inicio del VPN	2021
β	6	Tasa de descuento	10%
$c\,0$ (litros/km)	0.3		

5. Resultados del VPN para un tractocamión en varios años

Usando los parámetros de la Tabla 2 se obtienen los resultados que se muestran en la Tabla 3 y en la Figura 1 para los once tractocamiones que tienen diferentes consumos de combustible (primera columna) en el año 2021 comenzando por el que tiene un consumo de 0.3 litros/km (3.33 km/litro) hasta llegar al que consume 0.225 litros/km por combustible (4.44 km/litro). La diferencia en consumo de 0.3 litros/km a 0.225 litros/km es de 25%. El precio del tractocamión en pesos (columna 2) depende de su disminución en el consumo de diésel. En la tercera columna se muestra el incremento en el precio del tractocamión conforme disminuye el consumo de diésel (aumenta su eficiencia energética). La cuarta columna muestra el gasto en pesos del consumo de combustible en 5 años para los tractocamiones. En la quinta columna se muestra el ahorro de combustible en los 5 años para cada tractocamión. Finalmente en la última columna se muestra el Valor Presente Neto para cada vehículo en 5 años del uso del vehículo. Como se muestra en la Tabla 3, el VPN es negativo para los tractocamiones más eficientes, porque son más caros.

Tabla 3. Consumo de combustible y precios de los tractocamiones. El gasto por el consumo de combustible, el ahorro de combustible y el Valor Presente Neto se calculan para 5 años, del año 2021 al año 2025.

Consumo	**Precio camión**	**Incremento en precio**	**5 años**		
			Gasto Diésel	**Ahorro Total**	**VPN**

0.3	$2,800,000.00	$0.00	$1,545,381.88	$0.00	$0.00
0.2925	$2,835,000.34	$35,000.34	$1,506,747.34	$38,634.55	-$2,869.38
0.285	$2,870,021.88	$70,021.88	$1,468,112.79	$77,269.09	-$5,759.96
0.2775	$2,905,249.17	$105,249.17	$1,429,478.24	$115,903.64	-$8,856.30
0.27	$2,941,400.00	$141,400.00	$1,390,843.70	$154,538.19	-$12,876.17
0.2625	$2,980,340.58	$180,340.58	$1,352,209.15	$193,172.74	-$19,685.79
0.255	$3,025,946.88	$225,946.88	$1,313,574.60	$231,807.28	-$33,161.13
0.2475	$3,085,212.06	$285,212.06	$1,274,940.05	$270,441.83	-$60,295.35
0.24	$3,169,600.00	$369,600.00	$1,236,305.51	$309,076.38	-$112,552.34
0.2325	$3,296,644.87	$496,644.87	$1,197,670.96	$347,710.92	-$207,466.25
0.225	$3,491,796.88	$691,796.88	$1,159,036.41	$386,345.47	-$370,487.29

En la Figura 1 se puede observar que a los 5 años el ahorro total por el diésel es mayor que el incremento en el costo del tractocamión para todos los vehículos más eficientes, excepto los que tienen consumos de 0.24, 0.2325 y 0.225 litros/km.

Si se realiza el cálculo del VPN a 10 años resulta ser positivo para todos los primeros nueve tractocamiones, como se muestra en la Figura 2, debido a que el ahorro de combustible es más grande. A 15 años el VPN es positivo para los diez primeros tractocamiones. Para 20 años, el VPN es positivo para todos los once tractocamiones considerados.

Si se considera que los vehículos en lugar de recorrer 50000 kilómetros anuales en el año 2021 recorren un kilometraje de 70000 kilómetros, los ahorros en el consumo de combustible serán mayores por el mayor kilometraje que recorren en los años siguientes y por lo tanto el VPN será mayor, como se muestra en la Figura 3. En un uso del vehículo a 5 años el VPN es cero o positivo para todos los tractocamiones excepto los que tienen consumos de 0.24, 0.2325 y 0.225 litros/km, pero el VPN es positivo aún para esos tractocamiones cuando se consideran usos de los tractocamiones de 10 o más años. Esto se debe a que se consume más combustible al tener mayores kilometrajes y por lo tanto los vehículos más eficientes serán más rentables para el precio de combustible considerado en la Tabla 2.

Si se consideran todos los parámetros en la Tabla 2 y solamente se aumenta el precio del diésel del año 2021 de $20.5 pesos a $24 pesos el VPN aumenta, como se muestra en la Figura 4. En este caso a partir de un consumo de 0.2475 litros/km el VPN es negativo pero a 10 años el VPN es positivo para los once valores del consumo de combustible considerados. O sea que un vehículo eficiente es una mejor inversión

cuando aumentan los precios de los combustibles. Si el precio del diésel es muy bajo los vehículos eficientes no son una muy buena inversión; por ejemplo, con los parámetros de la Tabla 2 y solamente considerando un precio del diésel de 10 pesos, el VPN es negativo para todos los tractocamiones para 5, 10 y 15 años. Para 20 años el VPN solamente es positivo para aquellos que tienen un consumo de 0.3, 0.2925, 0.285, 0.2775, 0.27, 0.2625 y 0.255 litros/km.

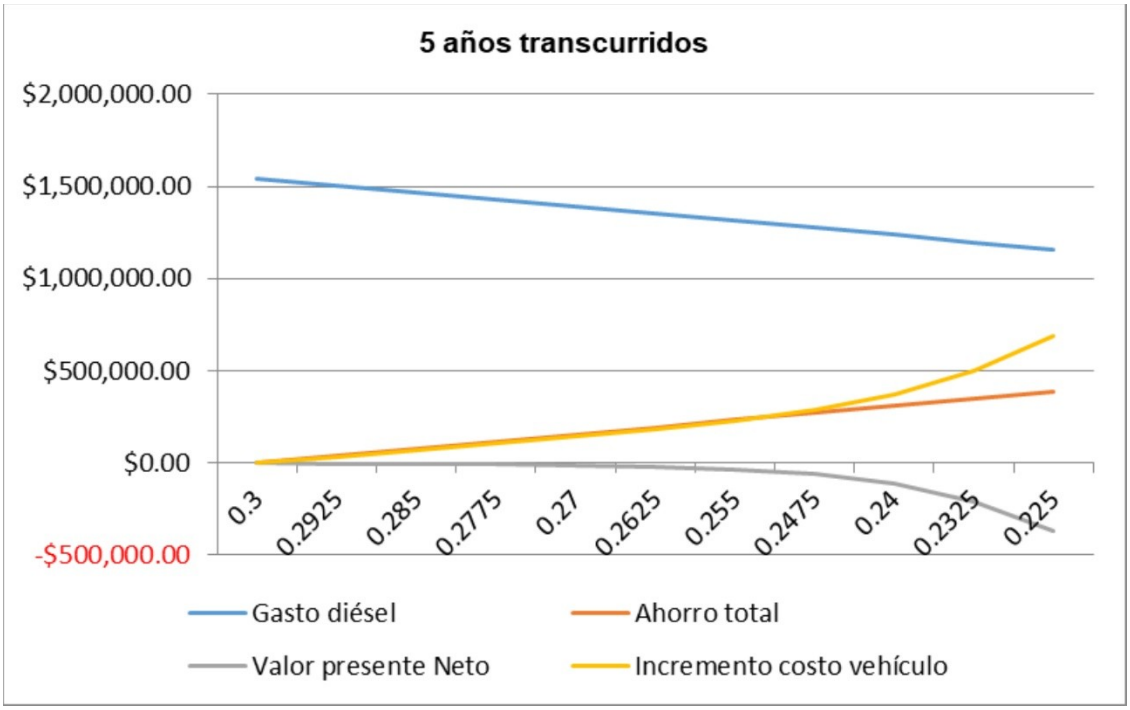


Figura 1. Gráfica con los resultados de la Tabla 3.

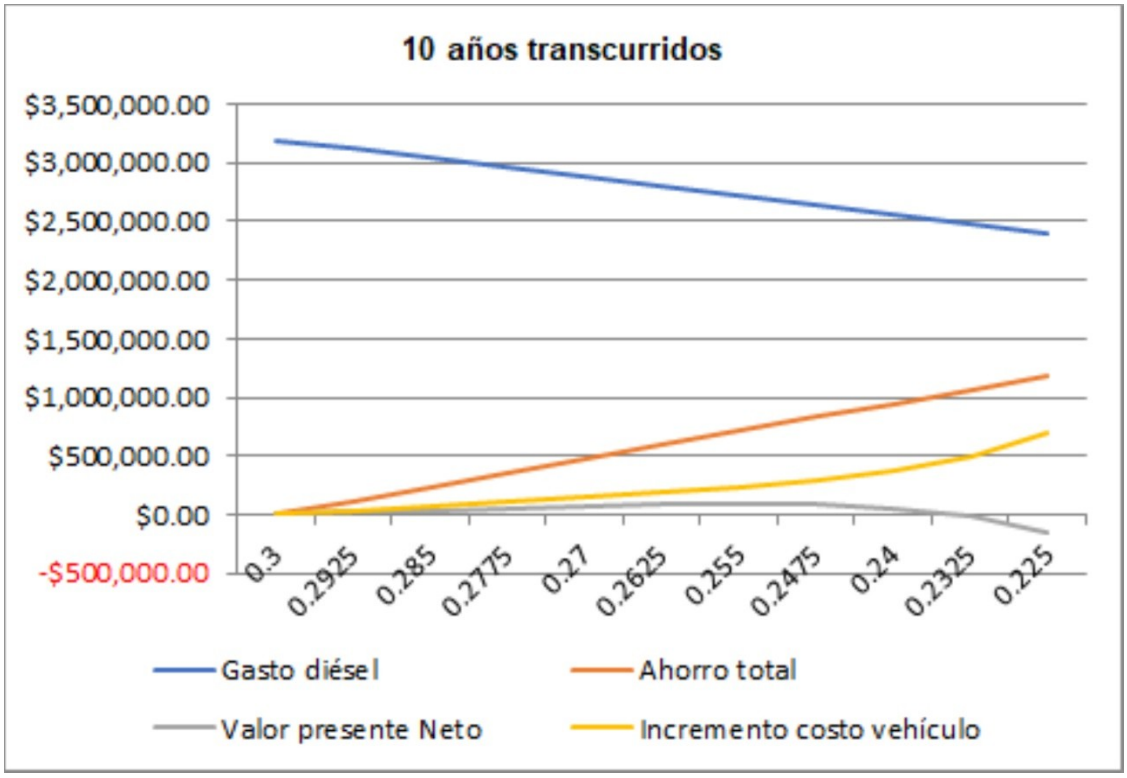


Figura 2. Resultados cuando se considera un uso del tractocamión de 10 años.

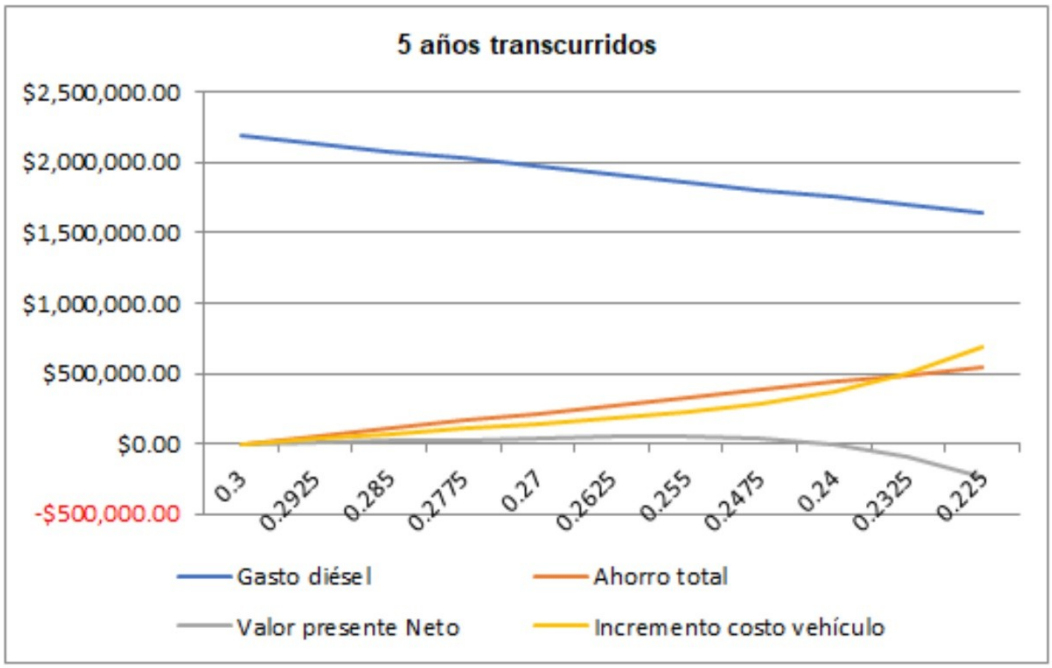


Figura 3. Gráfica con los resultados de aumentar el kilometraje en el año 2021 de 50000 a 70000 kilómetros por año.

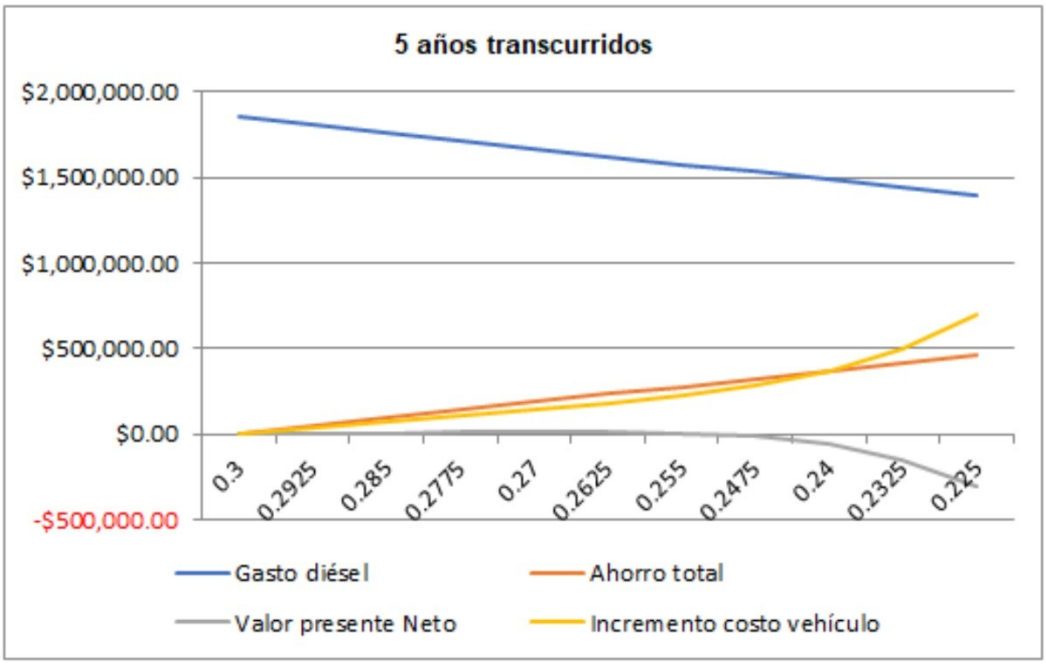


Figura 4. VPN para un precio del diésel de 24 pesos por litro en el año 2021.

Para poder implementar una norma es necesario evaluar la eficiencia energética de un vehículo pesado a certificar y constatar que cumple con los límites que se impongan. La certificación de la eficiencia energética se obtiene a través de un software, como uno que se ha desarrollado en México [7].

Junto con la herramienta para el cálculo del consumo de combustible de los vehículos pesados debe tenerse otra para evaluar el costo beneficio de obtener vehículos más eficientes que es lo que se presenta en este trabajo. Los coautores también han desarrollado una más para evaluar el costo-beneficio de la introducción de toda una flota de miles de vehículos pesados al parque vehicular, lo que se reportará en alguna otra publicación.

6. Conclusiones

Se ha mostrado el desarrollo y uso de una herramienta para el cálculo del costo beneficio de usar tractocamiones más eficientes en el transporte de bienes por carretera que se puede aplicar también al resto de los vehículos pesados. La herramienta se puede usar con los datos que requiera

la norma, cuando se le diseñe, para calcular las bondades de una normatividad de consumo de combustible y emisiones de gases de efecto invernadero. El cálculo de los precios de los vehículos nuevos más eficientes se podrá sustituir por los precios reales que existan en el mercado en el año que se implemente la norma y el cálculo del consumo de combustible se podrá evaluar con otra herramienta desarrollada por tres de los coautores en la manera descrita en otro trabajo que se publicará junto con éste.

7. Bibliografía

1. IEA, “The Future of Trucks: Implications for energy and the environment”, IEA, Paris, 2017.
2. Khatib H., "The Discount Rate - A Tool for Managing Risk in Energy Investments", IAEE Energy Forum, 4th Quarter (2015).
3. Busse, M., Knittel C., Zettelmeyer, F. Are Consumers Myopic? Evidence from New and Used Car Purchases, American Economic Review, 103 (1): 220-56 (2013).
4. Verboven F., “Implicit Interest Rates in Consumer Durables Purchasing Evidence from Automobiles”, CEPR Discussion Paper No. 2069, 1999.
5. Goh K., Jianyun H., Yi O., “The costs and benefits of fuel efficient cars: how high is the return?”, Economic survey of Singapore, Economics Division, Ministry of Trade and Industry, 2012.
6. EPA y NHTSA, “Greenhouse Gas Emissions and Fuel Efficiency Standards for Medium- and Heavy-Duty Engines and Vehicles — Phase 2”, Federal Register, V. 81, No. 206 (2016).
7. Domínguez-Vergara N., Pantoja-Gallegos J., Domínguez-Pérez D., “UAMmero, software para estimar el consumo de combustible y las emisiones de bióxido de carbono de vehículos pesados”, del Congreso multidisciplinario de ciencias aplicadas en Latinoamérica, Editorial UNAM, 600-606 (2018).

8. Agradecimientos

A Jesús Solís G., Luis Kato M., J. García O. y A. Maldonado S. También a los revisores del trabajo por sus observaciones. Uno de los autores (N. D.-V.) le agradece a H. Pérez-Vivián por su valioso apoyo.

Software educativo para la construcción de un sistema hidráulico en un entorno virtual

Bautista, L.Y.[1], Hurtado, G.[1], Gutiérrez L. Ma. R.[2], Barragán A. J. F.[2]

[1]Depto. de Ingeniería Mecatrónica, Facultad de Ingeniería UNAM

[2]Depto. de Ingeniería Química, Facultad de Química UNAM

luyababl@gmail.com, gahucho@ingenieria.unam.edu, rafaelag@unam.mx,

jfba@unam.mx

1. Resumen

Este trabajo presenta el desarrollo de Caudalis, un software con fines educativos para mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje en el estudio del flujo en tuberías, en un ambiente de realidad virtual. La finalidad de este software es permitirle al usuario construir y visualizar sistemas hidráulicos personalizados, con la finalidad de complementar o incluso de poder llegar a utilizar de forma virtual el uso de un modelo físico real (rígido e inmutable), como el utilizado actualmente en el Laboratorio de Ingeniería Química de la Facultad de Química de la UNAM. Esta herramienta presenta varias ventajas con respecto al modelo real, entre las que destacan: permitirle al usuario definir y variar la configuración de una tubería de manera sencilla, rápida y económica; otorgar a los estudiantes la posibilidad de visualizar el comportamiento de un flujo de agua que circula a través de una placa de orificio; y lograr un aprendizaje más claro y posiblemente lúdico, mediante el uso de tecnologías actuales aplicadas a la docencia.

2. Introducción

En la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México se detectó un área de oportunidad para la implementación de una nueva herramienta educativa, basada en el uso de realidad virtual, para el estudio del comportamiento del agua al pasar a través de una placa de orificio en una tubería.

La idea surge debido a que la realización física de este experimento en el Laboratorio de Ingeniería Química (Figura 1) consume mucho tiempo de la sesión para realizar el intercambio de las placas de orificio en el sistema de tuberías.



Figura 1. Sistema hidráulico utilizado en el Laboratorio de Ingeniería Química, Facultad de Química, UNAM.

El uso de un sistema físico también presenta los inconvenientes de que no es posible variar ni la configuración ni la extensión de las tuberías y de que, al ser éstas opacas, resulta imposible para los alumnos observar directamente el comportamiento del fluido que circula a través de las placas de orificio.

Con la intención de mejorar el proceso enseñanza-aprendizaje para este tema, se decidió desarrollar un software que permitiera construir sistemas hidráulicos virtuales, a fin de analizar, e incluso observar, el fenómeno en estudio de una manera más clara, ágil y hasta divertida para los estudiantes.

3. Condiciones experimentales

Para poder llevar a cabo el modelado virtual de un sistema, es necesario partir de un entendimiento total del funcionamiento del sistema físico real, que en este caso involucra dos variables de estudio: caudal y presión.

El sistema hidráulico por modelar se compone de los siguientes tres elementos fundamentales. En primer lugar, una bomba hidráulica, activada mediante un motor eléctrico, que proporciona un caudal de líquido adecuado. El gradiente de presión, por su parte, se genera debido a una resistencia al flujo, la cual se produce por el segundo elemento, que es la red de distribución, conformada por tuberías y conexiones. Finalmente, la placa de orificio es el instrumento utilizado

para medir el caudal en el interior de la tubería. Al circular el fluido a través de la placa de orificio, se incrementa la velocidad del flujo y disminuye la presión, convirtiéndose así en el punto donde se registran la velocidad máxima y la presión mínima, al cual se le conoce también como vena contracta (Figura 2).

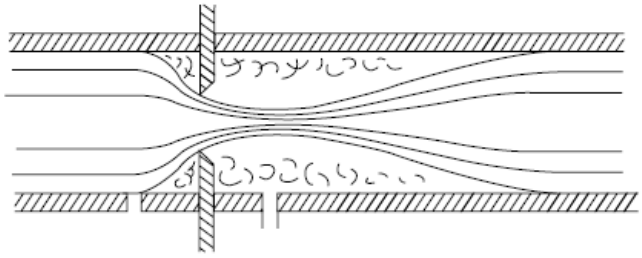


Figura 2. Comportamiento del flujo al pasar a través de una placa de orificio.[1]

3.1 Placas de orificio.

La placa de orificio estándar (Figura 3) es un disco circular con un orificio en el centro y una pestaña que se proyecta hacia un lado[1]. Generalmente se fabrica con acero inoxidable, de 0.12 a 0.5 pulgadas de espesor, dependiendo del tamaño de la tubería y de la velocidad del flujo.



Figura 3. Placa de orificio estándar.[2]

Algunas de las características principales de las placas de orificio incluyen las que se describen a continuación.[1],[2] Poseen capacidad para soportar presiones de hasta 40 MPa, temperaturas de hasta 800°C y suelen utilizarse en rangos de 29°C a 121°C. Estos dispositivos funcionan con líquidos, vapores y gases.

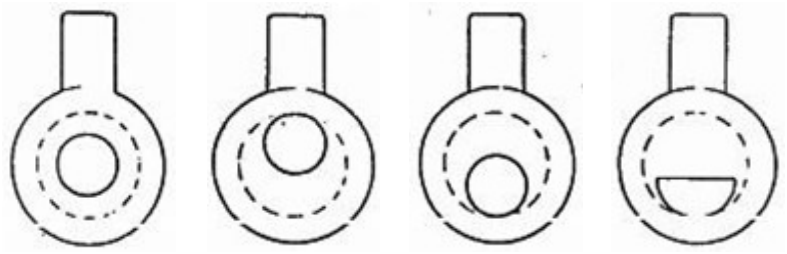
Por otra parte, existen cuatro tipos de placas de orificio atendiendo a su diseño mecánico[2],[3]:

1. Concéntricas. Es la forma básica de una placa de orificio, en donde el orificio se encuentra centrado (Figura 4a). Su uso se recomienda para fluidos limpios y de baja viscosidad.

2. Concéntricas cónicas. Al igual que las concéntricas, el orificio se encuentra en el centro, pero tiene la particularidad de que su diámetro se va reduciendo a medida que el fluido va atravesando el disco. Se recomienda su uso con fluidos que tienden a comportarse de forma turbulenta.

3. Excéntricas. Son aquellas en donde el orificio no se encuentra en el centro del disco, ya sea porque esté elevado levemente o se encuentre levemente debajo del centro (Figuras 4b y 4c). Suelen utilizarse en tuberías con diámetro pequeño.

4. Segmentadas. En este caso, el orificio no es un círculo, sino que tiene forma de un semicírculo o una "media luna" (Figura 4d). Por otra parte, pueden ser concéntricas o excéntricas. Se utilizan principalmente para la medición de fluidos que contienen partículas en suspensión.



(a) (b) (c) (d)

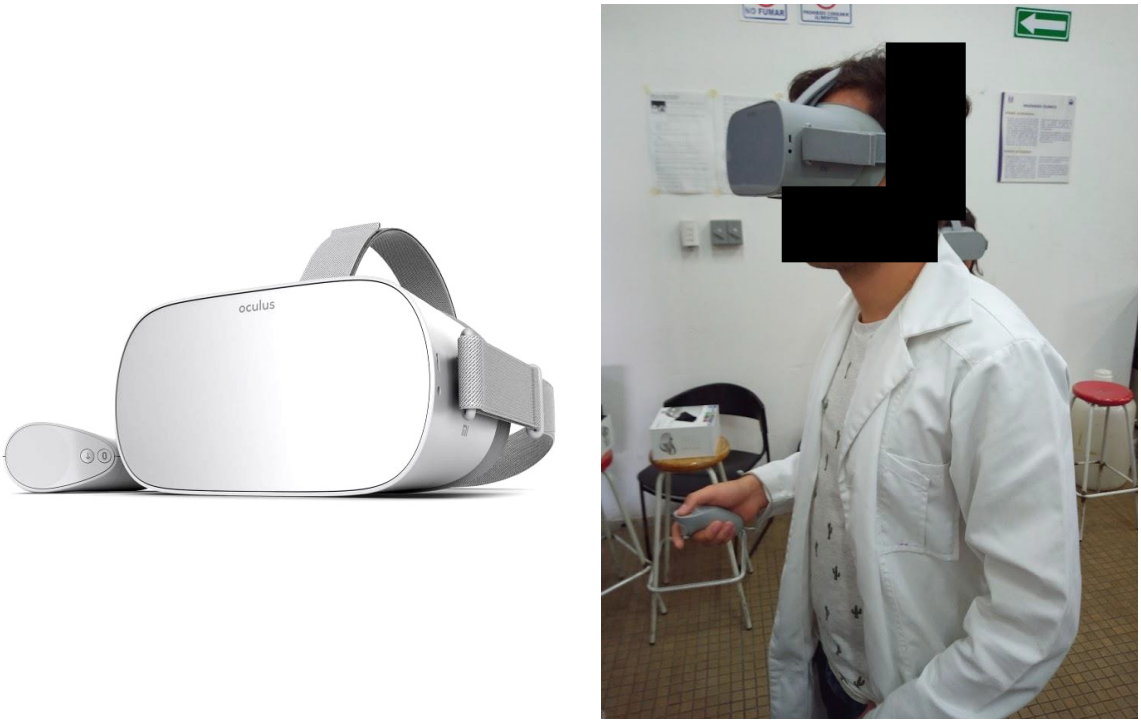
Figura 4. Tipos de placas de orificio: (a) concéntrica, (b) excéntrica hacia arriba, (c) excéntrica hacia abajo, (d) segmentada.[3]

3.2 Dispositivos para interacción con entornos virtuales.

Las aplicaciones de realidad virtual o VR (por sus siglas en inglés) buscan brindar al usuario una sensación de presencia o de estar "dentro" de un entorno virtual, lo cual se alcanza gracias a factores como la inmersión, participación e interacción. Para ello, la realidad virtual permite al usuario experimentar sensaciones a través de estímulos sensoriales coordinados y simultáneos mediante dispositivos de interacción especiales, tales como: dispositivos de interacción espacial, dispositivos colocados sobre la cabeza o HMD (por sus siglas en inglés, *Head Mounted Displays*), dispositivos hápticos, etc.[4]

Un HMD modifica la información visual hacia los ojos del usuario, reemplazándola con una perspectiva global del entorno virtual. Esto se logra montando una o dos pantallas muy cerca y frente a los ojos del usuario, con un sistema de lentes para permitir un enfoque más natural. De este modo, cualquier parte de una pantalla es únicamente visible en un ojo, volviendo al sistema autoestereoscópico.[5]

Para este trabajo se seleccionó como HMD un dispositivo Oculus Go[6] (Figura 5), dadas sus características y ventajas, entre las que destacan el ser un visor de realidad virtual portátil, por lo que no requiere adicionalmente de una computadora ni de cables de conexión para su funcionamiento. La experiencia del usuario se complementó incorporando un controlador con un panel táctil que le permite al usuario interactuar con el sistema y alternar el modo de funcionamiento del programa entre dos estados posibles: desplazamiento (a través del entorno) y construcción (de tuberías). El modo de desplazamiento o modo libre permite al usuario moverse dentro del entorno virtual, mientras que el modo de construcción le permite crear o modificar sistemas hidráulicos.



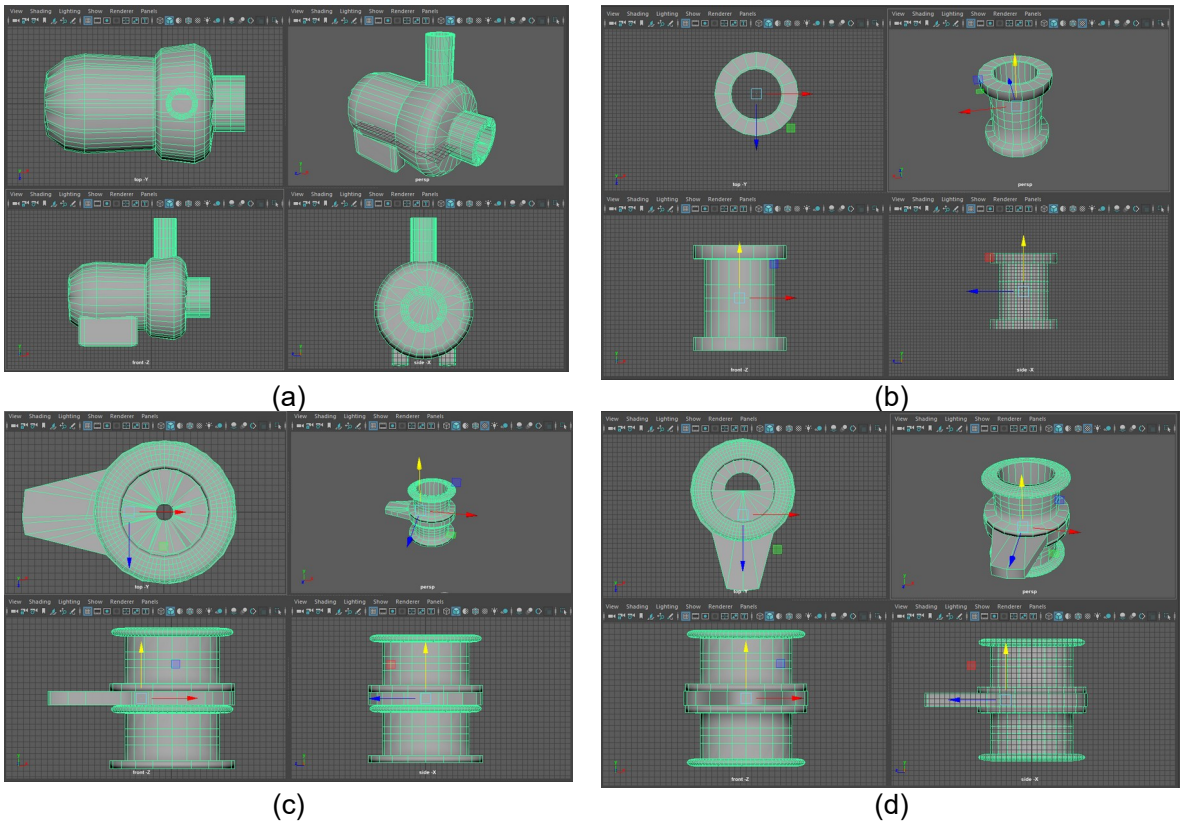
(a) (b)

Figura 5. Visor de realidad virtual y controlador de panel táctil utilizados: (a) sueltos, (b) en uso.

3.3 Desarrollo de Caudalis.

El desarrollo de este software educativo, nombrado Caudalis, requirió el modelado de objetos virtuales. Este modelado, dependiendo de cada aplicación, puede involucrar diversas etapas tales como: esculpir, animar, iluminar, pintar y agregar efectos visuales. En este caso, las herramientas empleadas para el desarrollo de Caudalis fueron las correspondientes a la actividad de esculpir objetos virtuales.

El entorno virtual es el lugar donde el usuario va a ser capaz de moverse y de construir los sistemas hidráulicos que desee. Para desarrollar el entorno virtual se utilizó *Unreal Engine 4* como motor gráfico, para modelar los componentes requeridos (Figura 6). En términos generales, un motor gráfico es un *middleware*; es decir, un grupo de funciones de biblioteca que resumen la mayoría de los detalles de implementación de bajo nivel, pero proporcionando al desarrollador una interfaz de programación de alto nivel.[4]



(a) (b) (c) (d)

Figura 6. Componentes modelados en *Unreal Engine 4*: (a) bomba de agua, (b) tramo de tubería recta, (c) placa de orificio concéntrica, (d) placa de orificio segmentada.

Para llevar a cabo el modelado del flujo de agua (Figura 7) se utilizó *Cascade*, un poderoso y robusto editor de sistema de partículas, incluido en *Unreal Engine 4*, que permite crear increíbles efectos visuales, desde humo, fuego, agua y más. Este editor permite crear y editar fácil y rápidamente los sistemas de partículas, además de ofrecer una retroalimentación en tiempo real y la edición de efectos.[7]

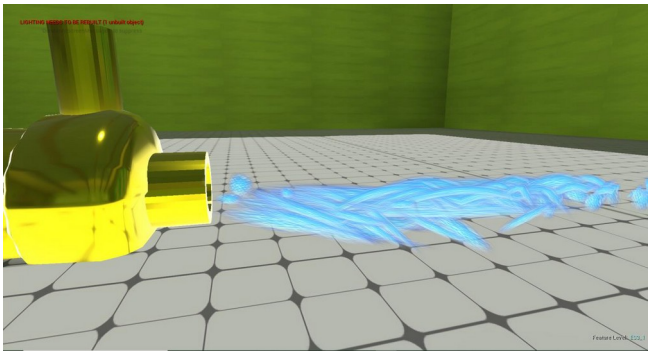


Figura 7. Modelado en Caudalis de un flujo de partículas de agua.

3.4 Etapa de pruebas y validación.

Una vez generada una primera versión del entorno virtual, se definió un protocolo de pruebas y se realizaron ensayos con alumnos de la Facultad de Ingeniería de la UNAM. Cada prueba concluía con un cuestionario de opinión, a fin de identificar áreas de oportunidad que permitieran mejorar la experiencia del usuario, en cuanto a aspecto, espacio de trabajo, selección de colores, sensación de mareo, por mencionar algunas. En la Tabla 1 se muestra la frecuencia de las respuestas obtenidas con relación a algunos de los aspectos evaluados por los usuarios. La escala de calificaciones se inicia en 1, como la calificación más baja, hasta 5, la calificación más alta.

Tabla 1. Resultados de la primera etapa de pruebas realizadas a Caudalis.

Aspecto	**Calificación**					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**
Velocidad de desplazamiento	1	1	4	0	4	3.5
Claridad de la interfaz	0	1	1	2	6	4.3
Facilidad de uso de la interfaz	0	0	0	5	5	4.5
Previsualización de elementos hidráulicos	0	1	2	4	3	3.9
Claridad de las instrucciones	0	0	3	4	3	4.0
Similitud del entorno con un laboratorio real	0	2	0	6	2	3.8
Apariencia del agua	0	1	0	3	6	4.4

Interacción del agua con los elementos hidráulicos	0	1	2	5	2	3.8

A partir de la información recabada, se implementaron modificaciones y mejoras en aspectos tales como texturas, selección de materiales, dimensiones del espacio de trabajo e inclusión de instrucciones de uso a la vista del usuario. También se realizaron mejoras en la calibración del controlador, velocidad de desplazamiento dentro del entorno virtual, visualización de componentes e interacción con la interfaz. El aspecto final del entorno virtual se muestra en la Figura 8.



(a) (b)

Figura 8. Aspecto final del programa: (a) Pantalla de carga, (b) entorno virtual.

Finalmente, se validaron los cambios realizados y el funcionamiento general del programa, repitiendo el protocolo de pruebas, pero esta vez con estudiantes de Ingeniería Química, de la Facultad de Química de la UNAM. Las respuestas obtenidas a través de los cuestionarios de esta segunda etapa de validación permitieron comprobar que los cambios realizados realmente lograron mejorar la experiencia del usuario y la facilidad de uso del sistema. La Tabla 2 muestra algunos de los rubros en los que se logró una mejoría sustancial; la escala de evaluación fue la misma que se utilizó previamente.

Tabla 2. Resultados de la segunda etapa de pruebas realizadas a Caudalis.

Aspecto	**Calificación**					
	1	**2**	**3**	**4**	**5**	**Promedio**
Velocidad de desplazamiento	0	1	1	4	3	4.0

Claridad de las instrucciones	0	1	1	0	7	4.4
Similitud del entorno con un laboratorio real	0	0	0	5	4	4.4

4. Resultados y discusión

Los resultados obtenidos, tras haber recibido una retroalimentación mediante dos iteraciones del protocolo de pruebas aplicado a estudiantes de Ingeniería, permitieron constatar el buen funcionamiento general del software desarrollado, su facilidad de uso y su idoneidad como herramienta didáctica.

Se comprobó que el espacio de trabajo definido es apropiado y que también se logró establecer una velocidad de desplazamiento adecuada que, a su vez, permitió reducir la sensación de mareo que pueden llegar a experimentar algunos usuarios al encontrarse inmersos en entornos virtuales.

Al haberse incluido instrucciones de uso dentro del entorno virtual, que fueran claras para los usuarios, resultó más fácil y rápida su adaptación y se redujo el tiempo de aprendizaje de su funcionamiento.

Se está trabajando actualmente en la mejora de este software, no sólo en cuanto al aspecto gráfico de los objetos virtuales. Se tiene considerado mejorar el sistema de partículas, para lograr una apariencia más real del flujo de agua. Se ampliará la cantidad de elementos hidráulicos disponibles, incorporando: uniones en Y, uniones en T, codos y válvulas de bola. Adicionalmente, se desea brindar a los usuarios la posibilidad de personalizar las dimensiones de la tubería: longitud y diámetro.

5. Conclusiones

El uso y aplicación de tecnologías actuales en el proceso educativo como, en este caso, la realidad virtual para la formación de ingenieros ofrece un gran potencial en varios aspectos, tales como:

1. Facilitar el aprendizaje de los estudiantes, a través de una herramienta interactiva de uso sencillo, clara, ilustrativa y entretenida.
2. Reducir sustancialmente los costos de realización de las prácticas, sin menoscabo de la calidad de la enseñanza, al permitir migrar de un sistema de experimentación real a un sistema de experimentación virtual; lo que no sólo elimina la necesidad de contar con una infraestructura física, sino que también

reduce los costos operativos al prescindir, en este caso, de la operación de la bomba hidráulica y del consumo de agua.

3. En esta aplicación se observan, además, las siguientes ventajas. Desde los puntos de vista económico y ecológico, se racionaliza el consumo de servicios como energía y agua potable. Se optimiza el tiempo en la sesión de clase, reduciendo sustancialmente el tiempo requerido para intercambiar las placas de orificio. Se añade flexibilidad experimental al poder variar, a voluntad y en pocos segundos, la configuración de la tubería, sin incurrir en ningún tipo de costos adicionales por concepto de materiales ni de mano de obra.
4. Este desarrollo permitirá incorporar nuevas soluciones didácticas para otras asignaturas de corte teórico dentro de los planes curriculares de ingeniería.

Se agradece el apoyo brindado al Programa de Apoyo a Proyectos para Innovar y Mejorar la Educación PAPIME con clave PE108419, sin el cual no habría sido posible la realización de este trabajo.

6. Bibliografía

70. Instrument Engineers Handbook: Process Measurement and Analysis, Fourth Edition, VOLUME 1
71. “PLACA DE ORIFICIO | Que es, como funciona y aplicaciones.” [Online]. Available: https://como-funciona.co/una-placa-de-orificio/. [Accessed: 12-Oct-2019].
72. “Medidores de flujo diferenciales. Placas de orificio.” [Online]. Available: http://www.sapiensman.com/tecnoficio/docs/doc16.php. [Accessed: 12-Oct-2019].
73. Malfatti S. M. et al “The Design of a Graphics Engine for the Development of Virtual Reality Applications,” Rev. Informática Teórica e Apl., vol. 15, no. 3, pp. 25–46, 2009.
74. Peek E. et al, “Virtual reality capabilities of graphics engines,” 21st Int. Conf. Cent. Eur. Comput. Graph. Vis. Comput. Vision, WSCG 2013 - Commun. Pap. Proc., pp. 39–48, 2013.
75. “Oculus Go | Funciones.” [Online]. Available: https://www.oculus.com/go/features/. [Accessed: 12-Oct-2019].
76. “Cascade Particle Systems | Unreal Engine Documentation.” [Online]. Available: https://docs.unrealengine.com/en-US/Engine/Rendering/ParticleSystems/index.html. [Accessed: 12-Oct-2019].

Sustracción de gasolinas en México, El uso de tecnologías y resultado de las acciones gubernamentales

Gasoline theft in México

The use of technologies and the result of government actions

1. Resumen

El robo de las gasolinas era un problema significativo para México, recientemente el gobierno mexicano implementó una serie de decisiones para tratar de controlarlo y abatirlo. Esta presentación es parte de una investigación en la que se analiza la naturaleza del problema y se plantean las diferentes opciones tecnológicas para coadyuvar en su abatimiento. Las preguntas que animan este trabajo tratan sobre la capacidad de las tecnologías para contribuir a resolver este problema y evaluar la estrategia seguida por el gobierno mexicano. Por otro lado, se hace explícito que la sustracción de gasolinas no es un problema exclusivo de México sino también de países como los Estados Unidos de América, la Unión Europea, Rusia, Ghana, Colombia y Serbia, aunque el monto de lo sustraído en México se encuentra comparativamente por encima de otros países.

2. Introducción e importancia

El primero de diciembre de 2018 el gobierno que iniciaba enfrentó un problema complejo y multifactorial, la sustracción ilícita de gasolinas que en ese momento alcanzaba los 70 mil barriles diarios (Mbd) [1], este ilícito se inició hace más de quince años. En campaña el presidente Andrés Manuel López Obrador había anunciado que se combatiría este delito y así lo hizo. La importancia del problema se hace explícita en las siguientes cifras que se muestran en la tabla 1 en la cual se compara la pérdida anual con varios *ítems* presupuestales.

Tabla 1. Monto e impacto comparativo de la sustracción

Rubro	Monto (Pesos mexicanos)	Porcentaje/No. veces
Pérdidas por robo de combustible	$ 66,300,000,000	100%
SHCP	$ 22,575,933,039	294% (3)
Educación Pública	$ 308,000,434,721	22% (0.22)
Salud	$ 123,266,865,116	53% (0.53)
CONACYT	$ 24,764,719,642	268% (2.68)
CRE	$ 248,276,703	26,704% (26.7)
CNH	$ 214,933,908	30,847% (30.8)
PEMEX (programable)	$ 464,601,648,743	14% (0.14)

UNAM	$ 44,942,499,166	148%	(1.48)

Fuente: Elaboración propia a partir de: https://www.ppef.hacienda.gob.mx/work/models/PPEF2019/paquete/egresos/Proyecto_Decreto.pdf, consultado el 3 de abril de 2020.https://www.gaceta.unam.mx/aprueba-la-unam-su-presupuesto-para-2019/, (consultado el 3 de abril de 2020).

2.1 La naturaleza del problema

En la figura 1. se establecen los principales elementos que configuran el problema y cómo interaccionan. En este mapa de relaciones y actores se puede notar la diversidad de mecanismos que adoptaba la sustracción ilícita, que van desde sustracciones en el mar, las tomas clandestinas en diferentes tramos de sus trayectos o desde las mismas refinerías.

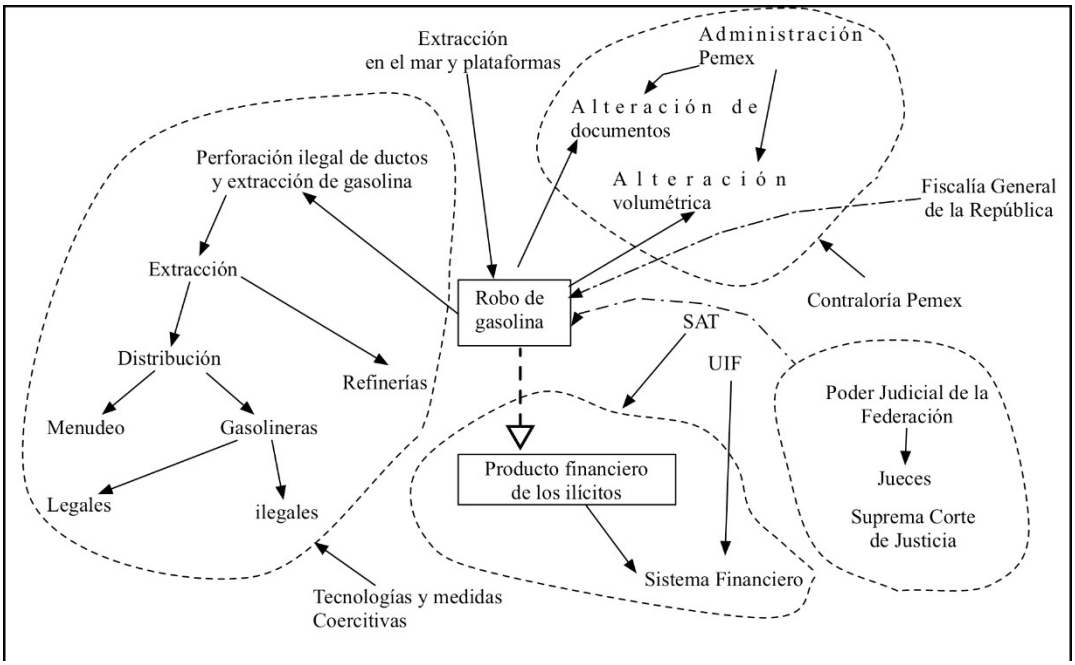


Figura 1. Anatomía del problema

Fuente: [2] y [3] ; Notas: Sistema de Administración Tributaria, SAT; Unidad de Inteligencia Financiera (UFI)

2.2 Características del problema

La naturaleza del problema es compleja y multifactorial y tiene orígenes diversos lo que sugiere un abordaje teniendo en cuenta múltiples aspectos y que la solución para abatir el robo de gasolinas no puede ser abordada únicamente con elementos tecnológicos, es decir, solo con tecnología. Por lo tanto, interesa en esta presentación responder las siguientes preguntas ¿cómo coadyuvan las tecnologías que se utilizan para la administración, control y logística, a la protección de la red de ductos de Petróleos Mexicanos (PEMEX) para evitar el robo de gasolinas? y ¿cuál fue el resultado de la estrategia gubernamental?

2.3 Alcance de la investigación

Se hace un análisis y evaluación de tecnologías utilizadas por PEMEX para enfrentar este delito, al igual que de la problemática a nivel internacional y además un análisis comparativo a nivel internacional.

3. Metodología

Revisión y análisis de la literatura y tecnologías a nivel mundial para lo cual se construyó un *corpus* de literatura sobre las tecnologías utilizadas a nivel internacional compuesto por 372 registros de patentes sobre protección de ductos de petróleo, y 75 artículos publicados en diferentes publicaciones internacionales eliminando todos los que tienen que ver con protección contra la corrosión. La búsqueda cubre patentes y artículos desde el año 2001 hasta marzo del 2019. Se agruparon en categorías para su estudio, y los resultados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2 Categorias tecnológicas

Categorías (patentes)	Número	Porcentaje
1.Sistemas de detección de fugas y grietas	100	27%
2. Sistemas de soporte y fijación	88	24%
3. Sistemas de limpieza	44	12%
4. Eficiencia energética	24	6%
5. Recubrimientos	93	25%
6. Otros	23	6%

Total	372

Categorías (Artículos)	Número	Porcentaje
7. Instalación y construcción	20	27%
8. Identificación de riesgos	22	29%
9. Análisis térmico	7	9%
10. Monitoreo y control	12	16%
11. Recubrimientos	8	11%
12. Otros	6	8%
Total	75	

Fuente: Johanna, Soto R. y Ciceri Hugo N. *Invenciones y tecnologías asociadas con la protección intrusiva de ductos que transportan petróleo y derivados*, 2020 (en prensa)

4. Resultados y discusión

El estudio de la información permitió clasificar las tecnologías en dos grupos: aquellas que se utilizan para operar y proteger los ductos y aquellas utilizadas para prevenir el ingreso de esas gasolinas al circuito del comercio legal. A continuación puntualizamos las correspondientes a cada grupo.

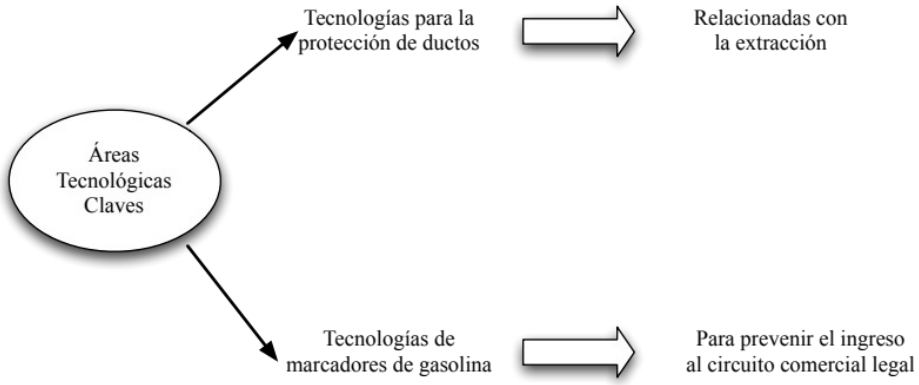


Figura 2. Tecnologías claves

Fuente: Johanna, Soto R. y Ciceri Hugo N. *Invenciones y tecnologías asociadas con la protección intrusiva de ductos que transportan petróleo y derivados*, 2020 (en prensa)

Tecnologías para protección y operación de ductos

Estas tecnologías pueden ser empleadas para la localización de fugas, abolladuras o rupturas, para la protección externa del ducto, esto quiere decir que se pueden emplear distintos materiales que se colocan como capas evolventes en la tubería con el objetivo de impedir intrusiones y también proteger al ducto de las condiciones exteriores como el clima o elementos del ambiente, también se pueden emplear para el análisis de la información recaudada por dispositivos detectores sobre las condiciones del ducto como temperatura, presión o flujo para determinar su estado y generar alarmas confiables y también para la vigilancia. Se pueden mencionar las siguientes tecnologías:

- Sensores presión
- Sensores ultrasónicos
- Recubrimientos especializados
- Sistemas de información geográfica
- Programas de identificación de riesgos
- Sistema Experto de Análisis de Fallas

• Sistemas de vigilancia

Cabe mencionar que los Sistemas de Información Geográfica (SIG) tienen varias aplicaciones, sin embargo, para el caso de la protección de ductos es una herramienta fundamental para caracterizar el derecho de vía, es decir, coadyuva en la gestión de rupturas estableciendo información sobre la localización geográfica de los fenómenos de interés.

Tecnologías para prevenir el ingreso al circuito comercial

Estas tecnologías han sido utilizadas para marcar las gasolinas, lo que permite realizar pruebas en las gasolineras para conocer la concentración de los marcadores y de esta manera conocer la procedencia para determinar la legalidad del hidrocarburo. Los marcadores moleculares de gasolinas deben ser altamente solubles en el medio, incoloros, su identificación debe ser a través de métodos de laboratorios sencillos, no pueden ser separados por disolventes convencionales o de bajo costo, deben tener un punto de ebullición en el rango del producto petrolífero y deben permitir una concentración razonablemente constante, es decir, no se deben asentar o separar. Los marcadores moleculares han sido utilizados en países de la Comunidad Económica Europea, Colombia, Serbia y Ghana para aumentar el consumo de combustibles procedentes de las estaciones oficiales y la recaudación de impuestos, en México no se utiliza:

• *Solvent Yellow 124*

• Accutrace o ((3- (sec-butil) -4- (deciloxi) fenil) metanetriil) tribenceno. Dow

Chemical

• NIRF paquete de marcadores.

• GC-MS.

• Fibras ópticas

Tecnologías utilizadas por PEMEX para la administración y protección de ductos. PEMEX posee un conjunto de tecnologías que le permiten realizar inspecciones internas, externas, indirectas o muestrales de las redes de ductos, para identificar y localizar defectos o anomalías y depende del tipo de peligros

aplicables identificados y de las condiciones de la infraestructura y operación. Estas tecnologías son:

• *SCADA* (por sus siglas en inglés*, System Control And Data Adquisition),*

• Drones

• Radares

• Sistemas de alarmas

• Equipos instrumentados o *diablos*:

• Equipo para pérdida de metal: Flujo magnético y ultrasonido

• Equipo para detección de grietas: Ultrasonido y Flujo transversal

• Equipo para la detección de la geometría: Geómetra (caliper)

4.1 Comparativo tecnologías a nivel internacional

En la tabla 3 se realiza una comparación de las tecnologías utilizadas a nivel internacional por los diferentes países tanto para operar, como así también para la protección de las instalaciones y en la tabla 4 se comparan las pérdidas a nivel internacional, demostrando la internacionalización de este delito.

Tabla 3. Tecnologías utilizadas a nivel intercional, elementos comparativos

México	• SCADA, Diablos. (Ver nota a pie)
Unión Europea	• *Atmos Theft Net,* • *Solvent Yellow* 124 • Marcador combustible *Accutrance*
Estados Unidos	• Detección de fugas • Rastreo de pipas • Sensores • Cámaras • Sistemas de vigilancia
Rusia	• Sensores vibroacústicos
China	• Sensores
Colombia	• Marcadores • Sistemas de detección de fugas • Sistema esférico de obstrucción de perforación ilícita • Marcadores
Serbia	• Marcadores
Ghana	• Sensores de movimiento, Alarmas

Fuente: *Soto Rodea, Johanna; Ciceri Hugo Norberto. Invenciones y tecnologías asociadas con la protección de ductos que transportan petroleo y derivados*, UNAM, 2020
Nota: a partir del inicio del gobierno del Presidente Lopez Obrador, se incrementó la vigilancia aérea, radares, drones, personal militar, patrullas, se recubrieron trazos importantes de los ductos para evitar su perforación entre otras medidas

Tabla 4. Comparación internacional de pérdidas por robo de combustibles

País	Pérdidas (Millones/US Dólares/año)	%	PIB/*per cápita*/ euros	Pérdida/ per cápita/ dólares
México	3,315	74	8,294	25
Unión Europea	4,480	100	84, 770	8.8
Estados Unidos	1,500	33.5	58,469	4.6
Rusia	714	15.9	9,557	4.9
Colombia	107	2.40	5,264	2.22
Serbia	45-110	1-2.5	6,590	15.8

Ghana	12.6	0.28	1,864	0.48

Fuente: Elaboración propia a partir de diversas publicaciones, ver referencias (Ralby, 2018; varias páginas electrónicas. Ver en referencias)

4.2 Resultados de la estrategia gubernamental

Desde el primero de diciembre de 2018 al 21 de diciembre de ese mismo año, la sustracción tuvo una variación negativa de -71.5% al pasar de 74 mil barriles a 23 mil barriles diarios [1]. (En solo unos pocos días la sustracción cayó en 51 mil barriles/día)

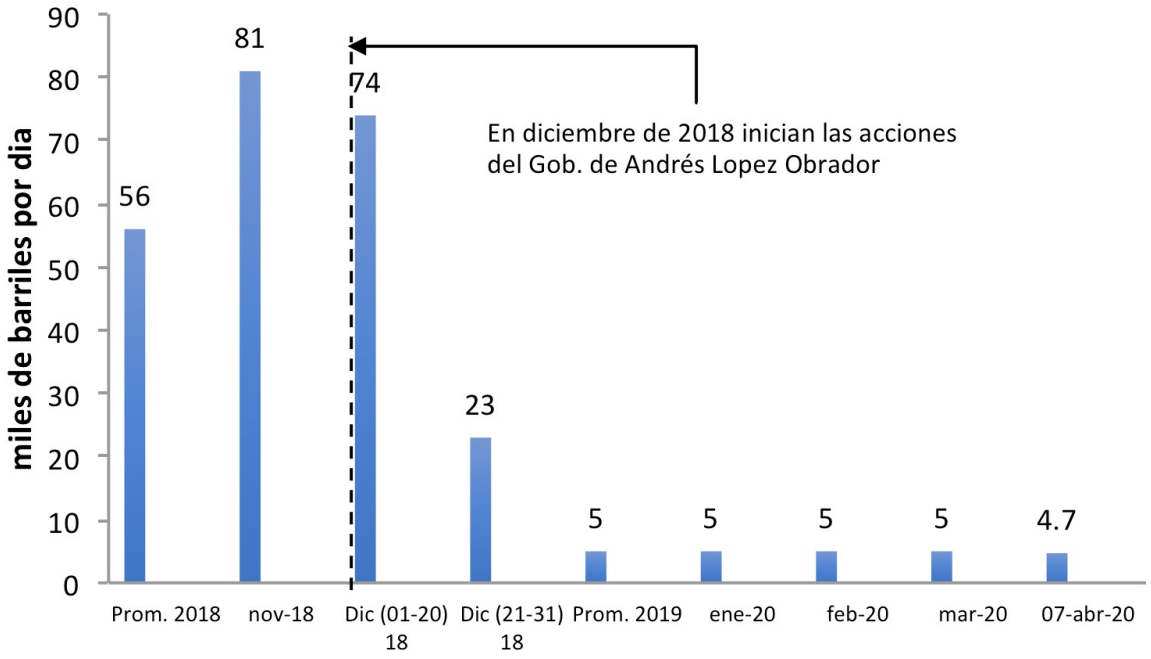


Figura 3. Sustracción de gasolinas/miles de barriles diarios

Fuente:*http://www.informeseguridad.cns.gob.mx/files/HUACHICOL_07042020.pdf, (consultado 8 de abril de 2020)*

• Luego pasó de 23 a 5Mbd, un -78.7%, donde se ha mantenido hasta el día de la fecha [1]. Estos números indican y soportan una estrategia con resultados efectivos y hablan también de la intensidad con que se llevó a cabo y el grado de coordinación logrado.

• La tecnología usada fue la que disponía PEMEX, a la que se agregó una intensa vigilancia a los ductos y

el sellamiento de tomas clandestinas y cambios administrativos.

5. Conclusiones

• El gobierno, atacó el problema desde varios ángulos, incluido el social y reemplazó a numerosas personas que tenían la responsabilidad de la operación de los ductos.

• También es necesario reconocer que, PEMEX contaba con tecnología adecuada, entre ellos sistemas administrativos avanzados tales como: *SCADA (System Control And Data Adquisition)*, drones, radares, entre otros artefactos. Sin embargo, todos estos artefactos tecnológicos se convirtieron en piezas inútiles ya que grupos ajenos a la empresa lograron incorporar o cooptar a numerosas personas que operaban esos instrumentos tecnológicos en beneficio de particulares como fue en este caso.

• Por otro lado, no hay duda de que el uso de tecnologías puede coadyuvar a acotar este problema, aunque lo esencial está en el personal que integra la empresa.

• Finalmente, en relación con la pregunta formulada al inicio de esta presentación relacionada con la valoración de la estrategia establecida por el gobierno, se puede afirmar que ha sido exitosa. El más notorio es el abatimiento del volumen de barriles sustraídos. El segundo es la voluntad política para enfrentar la corrupción. El tercer punto, que es muy significativo y que ha marcado un hito, es la demostración de una habilidad superior en su ejecución*, ya que es una estrategia con objetivos múltiples que debió ser lograda en un contexto complejo y adverso, en forma secuencial y con situaciones que implicaban simultaneidad en la acción* [6]

• Si bien las metas estratégicas del gobierno han sido logradas, todavía queda un remanente de unos 4.7 Mbd (miles de barriles diarios) que comparado con las cifras anteriores se pueden considerar como residuales, aunque es una cantidad que implica unos 60,000 barriles al año que todavía no tienen explicación clara. Pemex reporta este desvío como producto de acciones ilegales [7]. Es posible suponer que parte de esa merma podría deberse también a pérdidas ocasionadas por derrames accidentales o por problemas operativos. En definitiva, esta cifra ya se encuentra en el rango “normal” a nivel mundial.

6. Bibliografía

1. SSPC. 2020. Secretaría de Seguridad y Protección Ciudadana. IV. Reporte diario del desvío de hidrocarburos reportados por Petróleos Mexicanos (PEMEX). Consulta el 7 de abril de 2020. Página electrónica http://www.informeseguridad.cns.gob.mx
2. Soto-Rodea, J. 2020. *Principales tecnologías utilizadas para combatir el robo de gasolina: El caso de México*. Tesis. Universidad Nacional Autónoma de México, UNAM. Ciudad de México, México.
3. Soto-Rodea, J.y Ciceri, H.N. 2020. *Invenciones y tecnologías asociadas con la protección intrusiva de ductos que transportan petróleo y derivados.* En prensa.
4. Ciceri, H.N y Soto-Rodea, J., *“Economic and social impact of the illicit substraction of gasolines:*

the case of Mexico" 2020, aceptado para publicación, mayo de 2020.
5. Ralby, I.M. 2018. Downstream oil theft: Global modalities, Trends and Remedies. *Atlantic Council Global Energy Center*, 2017. https://www.gob.mx/presidencia/prensa/conferencia-de-prensa-del-presidente-andres-obrador-27-de-diciembre-2018, (consultado el 12 de julio del 2019); Fondo Monetario Internacional y datosmacro.com y https://dprom.online/oilngas/sejchas-kak-vrezhu-ili-problema-hishheniya- nefti-v-rossii/, (consultados el 7 de abril de 2020, en ruso).
6. Ciceri, H.N. 1994. *Teorización sobre la fluidez contextual y la toma de decisiones*. Ver: El caso de Vitro S.A, capítulo 7, p. 133. *University of California San Diego, UCSD, La Joya*. Abordar una estrategia de esta naturaleza requiere una habilidad de conducción política y de ejecución superior, ya que los diversos actores van reaccionando y le confieren a la planeación de las mismas un estado de fluidez contextual es una situación que se produce en el macro entorno - macro contexto- donde los cambios se caracterizan por tener discontinuidades. En otras palabras las mediaciones que existen en entornos estables en relación con la toma de decisiones concretas se ven alteradas.
7. PEMEX. 2019. Sistema de Monitoreo Automatizado del Empaque (SMAE). Reporte por desviación del mercado ilícito de combustible, cálculos hechos por PEMEX. Información interna. Ciudad de México, México.

Detección de movimiento usando una tarjeta Arty Z7-10 y OpenCV

Vega-Luna, J. I.[1], Salgado-Guzmán, G. [1], Cosme-Aceves, J. F. [1], Tapia-Vargas, V. N. [1], Sánchez-Rangel, F. J. [1], Lagos-Acosta, M. A. [1]

[1]Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, Ciudad de México, 02200.

vlji@azc.uam.mx, gsg@azc.uam.mx, cajf@azc.uam.mx, vtapia@azc.uam.mx, fjsr@azc.uam.mx, mlagos@azc.uam.mx

1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue realizar un sistema de detección de movimiento en la puerta de acceso de un centro de datos. El sistema almacena las imágenes de la escena al detectar movimiento y las transmite al servidor de video vigilancia para su registro. Se desarrolló usando una tarjeta Arty Z7-10, Python, bibliotecas de OpenCV y una cámara de video. El método usado para la detección fue el de sustracción de fondo. El uso del sistema es para visualizar en los archivos de video vigilancia los momentos donde ocurre el acceso. Las pruebas realizadas mostraron que el tiempo de respuesta del sistema fue 100.3 ms. A partir de los resultados logrados, el sistema puede usarse en otro tipo de instalaciones o aplicaciones de tiempo real.

2. Introducción

En un centro de datos, o centro de procesamiento de datos (CPD), se encuentran instalados los recursos informáticos para el procesamiento, almacenamiento y transmisión de la información de empresas y organizaciones. Uno de los aspectos fundamentales en la operación de un CPD es la seguridad. Ésta tiene como objetivo garantizar la integridad de la información y acceso confiable a instalaciones y equipo, ya que de esto depende la continuidad del negocio de clientes y usuarios. La seguridad de un CPD incluye tanto el aspecto físico como el lógico. El primero se ocupa del acceso físico para reducir o evitar intrusiones a las instalaciones del CPD y salas de equipo al CPD, mientras que seguridad lógica trata de protección de la información. El acceso a las salas está controlado estrictamente y solo puede entrar personal de mantenimiento y operaciones ya que representan la capa más alta en cuanto al funcionamiento y nivel de protección del CPD [1].

Existen diferentes mecanismos de control y monitoreo en el acceso físico a las sala de equipo de un CPD, entre los que se encuentran: dispositivos biométricos, tarjetas magnéticas y electrónicas y sistemas de video vigilancia o de circuito cerrado de TV (CCTV). Los CCTV operan permanentemente y registran la señal de video tanto en la entrada como en el interior de las salas de equipo [2].

Los procedimientos y medios de control de acceso de un CPD son uno de los aspectos que son auditados por instituciones y empresas que certifican la calidad de servicios del CPD. Esto permite a los clientes tener certeza y confianza que el CPD cumple con estrictas normas y estándares en su operación [3]. Las certificaciones exigen que los responsables del CPD tengan siempre disponibles en cualquier momento los archivos de registro de video del CCTV y el procedimiento usado para indicar en ellos la hora en que las personas entran y salen de las salas de equipo durante el día [4].

Este trabajo se realizó por requerimiento de una empresa operadora de centros de datos. Se solicitó realizar un sistema de detección de movimiento de personas y objetos en la puerta de acceso de la sala de equipos del CPD. Uno de los requerimientos del sistema fue almacenar en un archivo las imágenes del momento en el cual se detecta el movimiento y transmitir, al final del día, los archivos registrados. Se solicitó realizar un sistema compacto, de fácil uso y mantenimiento y que no modifique la operación e instalación del CCTV ni el mecanismo de acceso usado en la puerta.

A partir de los requerimientos establecidos, la solución propuesta fue desarrollar el sistema usando una tarjeta que pueda programarse de forma sencilla y eficiente, que cuente con una interfaz de red Ethernet y a la que pueda conectarse una cámara de video. Una de las formas para lograr tal fin fue utilizar la tarjeta Arty Z7-10. Esta tarjeta trabaja usando la plataforma de desarrollo Xilinx Zynq SoC y la imagen de PYNQ. Integra un SoC (System On a Chip) el cual incluye un procesador y un FPGA (Field Programmable Gate Array). La configuración y programación del SoC puede llevarse a cabo usando lenguajes de descripción de hardware como VHDL o Verilog. Sin embargo, el desarrollo de aplicaciones que demandan gran poder de cómputo, usando VHDL o Verilog puede ser tardado e inclusive ineficiente. Una alternativa que ofrecen los avances tecnológicos actuales es el uso de lenguajes de programación interpretados y orientados a objetos como Python.

La tarjeta Arty Z7-10 usada en este trabajo se programó a través del lenguaje Python y bibliotecas de OpenCV. Se conectó a la tarjeta una cámara de video HDMI para capturar las imágenes de la puerta de la sala de equipo y la detección de movimiento se implantó usando el método de sustracción de fondo a través de Python y funciones de OpenCV.

La detección de objetos, personas y movimiento de las mismas se realiza usando dos técnicas diferentes. La primera utiliza dispositivos electrónicos que incluyen sensores, cámaras de video o cámaras térmicas que activan un actuador o registran el evento. Algunos sensores comúnmente utilizados son los: pasivos infrarrojos (PIR-Passive Infrared), de radar y ultrasónicos. La segunda técnica combina el uso de un dispositivo, como los indicados anteriormente, y un algoritmo o método de visión por computadora. Esta técnica ha sido un tema estudiado extensamente dada su importancia en diversas aplicaciones de visión por computadora como por ejemplo: sistemas de vigilancia [5] y detección de intrusos, reconocimiento y sistemas de seguridad, rescate de personas, exploración en entornos peligrosos, navegación de vehículos autónomos y aéreos, conteo de objetos y personas [6] y análisis de signos vitales [7], entre otras. La captura y procesamiento de las imágenes puede ser en dos tipos de escenas: donde la cámara está fija y el que se mueve es el objeto a detectar o donde la cámara y el objeto están en movimiento. En el primer escenario existen diferentes algoritmos de los cuales la mayoría se fundamenta en la sustracción de fondo o la diferencia temporal.

La sustracción de fondo consiste en obtener una imagen binaria, en la cual, las regiones con valor 1 indican los objetos en movimiento y las regiones con valor 0 representan el fondo. La imagen binaria se genera usando un umbral en el resultado de la sustracción de la imagen capturada con una imagen de fondo o segundo plano. El segundo escenario es más complejo, ya que detectar un objetivo en movimiento es un proceso difícil debido a que las imágenes se degradan con la existencia de objetos ajenos a la persona u objeto a detectar, como por ejemplo: arboles balanceándose, ondas de agua, gotas de lluvia y fenómenos climatológicos. Esto último hace que la escena se considere caótica y desordenada. La mayoría de métodos tradicionales usados en estos escenarios usan la extracción de fondo basados en la información de color y textura de los objetos [8]. Sin embargo, el color es sensible a las variaciones de iluminación y la textura no se puede usar para separar objetos lisos [9]. Es por esto que las investigaciones realizadas los últimos años en este campo, se han enfocado principalmente en el uso de mejores procesos de captura de imágenes y algoritmos y métodos de corrección de imágenes distorsionadas o perturbadas por el movimiento.

Las trabajos llevados a cabo recientemente sobre la detección de movimiento con cámaras móviles proponen el uso de procesos y tecnologías como las siguientes: arreglos o mallas de antenas de radar del tipo entrada-múltiple/salida-múltiple (MIMO-Multiple-Input Multiple-Output) para obtener mejor resolución espacial de imágenes [10]; transformada de Fourier dispersa para separar el primer y segundo plano de la imagen [11]; radares Doppler no-estacionarios [12]; radar de apertura sintética (SAR-Synthetic Aperture Radar) para auto-enfoque de imágenes [13]; transformada de Fourier de Tiempo Corto (STFT-Short-time Fourier Transform) con redes neuronales convolucionales para determinar el contenido en frecuencia y de fase de la onda senoidal en secciones locales y los cambios de la imagen en el tiempo [14]; sustracción de segundo plano basado en modelos auto-regresivos de movimiento (ARMA-Autoregressive Moving Average) [15]; contraste de forma de onda a través de ruido Gaussiano blanco [16]; extracción del primer plano utilizando

matrices que representan la trayectoria de partículas en la señal de video [17]; extracción y generación de características a través de matrices adaptivas basadas en disparidad para compensar el movimiento de la cámara [18]; redes neuronales convolucionales de 18 capas de profundidad (ResNet-18) [19]; rotación basada en el momento angular orbital de objetos e iluminación de la escena [20] y sustracción de segundo plano por mezclas Gaussianas mejoradas [21].

La técnica o algoritmo a usar depende de la aplicación, necesidades y escenario. En este trabajo no se utilizó un algoritmo sofisticado como los indicados anteriormente. Se implantó el de extracción o sustracción de fondo o segundo plano, ya que la cámara no está en movimiento y debido a que ha demostrado ser el más efectivo para la detección de movimiento por su sencillez, tiempo de respuesta y porque no consume tiempo excesivo de procesamiento.

No se ha realizado hasta el momento una aplicación como la aquí desarrollada para un centro de datos. Las ventajas y aportaciones de este trabajo son las siguientes: 1) La instalación y operación del sistema no es intrusiva, ya que no interfiere con el sistema de video vigilancia ni con los mecanismos de acceso. No se modificó la infraestructura del CPD; 2) Aunque se encuentra disponible comercialmente una gran variedad de soluciones de detección de movimiento que integran una cámara de video, la cual se encuentra permanentemente capturando y almacenando la señal de video, ninguna incluye un mecanismo de captura de imágenes y registro de la hora al detectar movimiento como lo solicitó el CPD y 3) La tecnología usada es de reciente creación, las herramientas software usadas son de código abierto lo cual redujo la complejidad y costo del sistema.

3. Condiciones experimentales

El sistema desarrollado se dividió en dos módulos: el de captura y procesamiento y el de detección.

3.1 El módulo de captura y procesamiento.

La función principal de este módulo fue capturar las imágenes usadas en el algoritmo de detección de movimiento. Está integrado por la tarjeta de desarrollo Arty Z7-10 y una cámara de video HDMI Logitech Pro C922 conectada al puerto del mismo nombre de la tarjeta. La cámara tiene resolución configurable de 720 pixeles/60 cuadros por segundo o 1080 pixeles/30 cuadros por segundo, en este trabajó se usó la segunda resolución. El módulo de captura se instaló en la parte superior del acceso a la sala de equipos del CPD usando la estructura de montaje de la cámara del CCTV para capturar la misma escena y ángulo de vista como se indica en la Figura 1.

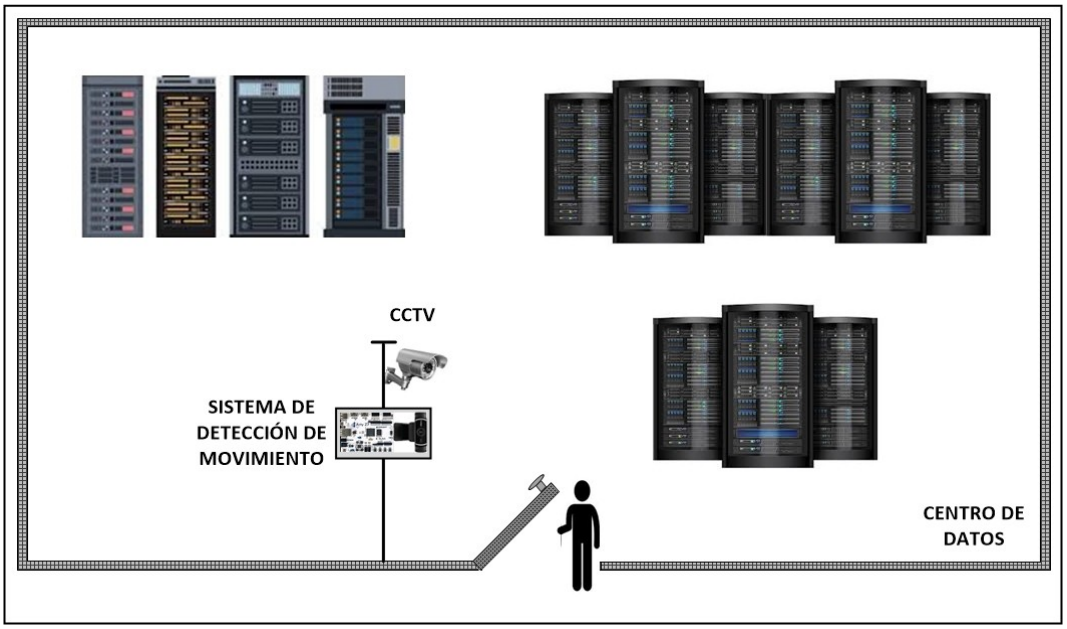


Figura 1. Instalación del módulo de captura y procesamiento.

Una de las razones para usar la tarjeta Arty Z7-10 fue que puede cargase en ella la imagen de la plataforma PYNQ. Ésta plataforma de código abierto permite el uso del lenguaje Python y bibliotecas para facilitar el desarrollo de aplicaciones embebidas de alto rendimiento explotando las características de microprocesadores y dispositivos de la lógica programable del SoC. Algunas aplicaciones de este tipo incluyen las siguientes: ejecución de código en paralelo, procesamiento de video de alta velocidad y señales en tiempo real, aceleración de algoritmos y manejo de entrada/salida de ancho de banda alto. El acceso a esta plataforma se lleva a cabo a través del ambiente de computación interactiva basado en navegador Jupyter Notebook. Por medio de Jupyter Notebook pueden crearse documentos que incluyen: código, gráficos, widgets para acceso fácil a funciones frecuentemente usadas con información visual, texto explicativo, ecuaciones, imágenes y video. Todo lo anterior puede realizarse por medio de programas en Python creando bibliotecas y arquitecturas reconfigurables virtuales, llamadas overlays, que se sobreponen en la estructura física del FPGA. Los overlays permiten acelerar la ejecución de programas y personalizar el hardware e interfaces del FPGA. La plataforma PYNQ proporciona un overlay base, el usado en este trabajo, que permite el uso de todas las entradas y salidas de la tarjeta Arty Z7-10.

3.2 El módulo de detección.

El objetivo de este módulo fue implantar el algoritmo de sustracción de fondo. Se realizó usando Python y bibliotecas de OpenCV y se basa en el uso de una imagen de referencia sin movimiento de la escena y una o varias imágenes con movimiento de la escena capturadas posteriormente. La primera imagen se denomina fondo o segundo plano y las siguientes se llaman

imágenes de primer plano. Se detectan zonas en movimiento comparando las imágenes del primer con el segundo plano para encontrar las diferencias entre ellas. La comparación se realiza mediante la resta o sustracción, donde la imagen resultante es de fondo negro y las zonas donde se detecta movimiento son de color distinto.

Dependiendo la forma de llevar a cabo la sustracción, este método puede realizase usando una de dos técnicas. La primera realiza la sustracción de la imagen de referencia o fondo con las imágenes con movimiento para determinar los objetos que se mueven en la escena. Está técnica tiene las desventajas que es sensible a la iluminación del lugar y al posible movimiento de la cámara, ya que aun siendo pequeños los movimientos, pueden generarse falsos positivos. Las ventajas de esta técnica son que puede obtener buenos resultados en escenas bien iluminadas y determinar eficientemente siluetas de objetos o personas en movimiento. En la segunda técnica la imagen de fondo se obtiene del resultado de la sustracción. Esto es, inicialmente captura una imagen de referencia e invoca un retardo de tiempo. Posteriormente, captura la segunda imagen y realiza la sustracción de ambas. La imagen resultante se usa como fondo o referencia para la siguiente iteración. El proceso de sustracción se realiza sucesivamente con las siguientes imágenes capturadas. Está técnica tiene las desventajas que es sensible al retardo usado entre capturas y por lo tanto a la velocidad de objetos y personas, incluyendo situaciones en la que las personas detienen el movimiento, y no es eficiente para determinar siluetas. Las ventajas de esta técnica son su eficiencia ante los cambios de iluminación y movimientos de la cámara.

El algoritmo implantado en este sistema usó la primera técnica y se llevó a cabo en ocho etapas: 1) Creación de la imagen de referencia, 2) Captura de las imágenes de comparación, 3) Obtención de la diferencia absoluta en las imágenes de comparación, 4) Obtención de la diferencia absoluta entre la imagen de referencia y las de comparación, 5) Creación de la imagen binaria de la diferencia absoluta, 6) Dilatación de la imagen binaria, 7) Obtención de los contornos y 8) Creación del rectángulo en los contornos.

3.2.1 Creación de la imagen de referencia.

Esta fase consiste de tres operaciones. La primera es la captura de la imagen de referencia, fondo o segundo plano, usando las funciones de OpenCV *cv2.VideoCapture()* y *cap.read()*, las cuales permiten la captura, con la cámara de video, de un cuadro de la escena estática, sin movimiento. La segunda operación es convertir la imagen anterior a escala de grises a través de la función *cv2.cvtColor()*. La última operación es reducir el ruido generado por la cámara e iluminación de la escena filtrando y suavizando la imagen aplicando un filtro Gaussiano con la función *cv2.GaussianBlur()*. En la Figura 2 se muestra la imagen original del segundo plano y la imagen de referencia creada en esta fase.

3.2.2 Captura de las imágenes de comparación.

En esta fase se capturan tres cuadros o imágenes que servirán como primer plano para la detección de movimiento y se convierten a escala de grises. Se llevó a cabo usando las funciones empleadas en la etapa anterior. Puede usarse solo una imagen en esta fase, sin embargo, se logran mejores resultados utilizando más de una y determinando las diferencias entre ellas. En la Figura 3 se muestra la primera imagen de comparación original y la misma convertida a escala de grises.



Figura 2. Imagen original del segundo plano e imagen de referencia.



Figura 3. Primera imagen de comparación original y con filtro aplicada.

3.2.3 Diferencia absoluta en las imágenes de comparación.

En esta fase se genera la imagen que servirá como primer plano a partir de las imágenes capturadas en la fase anterior. Cosiste de dos acciones, en la primera se convierten a escala de grises las tres imágenes y se obtiene la diferencia entre ellas. Esto último se realizó usando la función *cv2.absdiff()* con la primera y la segunda imagen y posteriormente cv2.absdiff() con la segunda y tercer imagen. El resultado de las funciones anteriores son dos matrices que se fusionan con la función *cv2.bitwise_and()*. La función *cv2.bitwise_and()* realiza la operación lógica AND de las matrices, bit a bit, para obtener la imagen de primer plano que indica los pixeles diferentes en las tres imágenes. Se utilizó la función *cv2.absdiff()* para obtener valores absolutos en la diferencia de pixeles y evitar valores negativos.

3.2.4 Diferencia absoluta entre la imagen de referencia y las de comparación.

En esta fase se aplica un filtro Gaussiano a la imagen obtenida en la etapa anterior, imagen de primer plano, con la función *cv2.GaussianBlur()* y se obtiene la diferencia absoluta de ésta con la imagen de segundo plano usando la función *cv2.absdiff()* para generar la imagen binaria con la se trabajará en las fases siguientes. En la Figura 4 se muestra la imagen resultado de esta fase.

3.2.5 Creación la imagen binaria de la diferencia absoluta.

Esta fase consiste en seleccionar de la imagen obtenida en la etapa anterior los pixeles cuyo valor sea mayor a un umbral establecido. El valor de los pixeles de la imagen resultante será binario. Los pixeles cuyo valor sea mayor al umbral serán blancos y en caso contrario serán negros para indicar el objeto en movimiento. Esto se llevó cabo usando la función de umbral de OpenCV *cv2.threshold()*.

3.2.6 Dilatación de la imagen binaria.

En el procesamiento de imágenes basadas en perfiles o contornos se pueden usar dos operaciones morfológicas básicas: la erosión y la dilatación. Se utilizan para remover ruido, aislar o unir componentes de una imagen y localizar protuberancias o huecos en la imagen. Para obtener los contornos del objeto o persona en movimiento en esta fase se erosionó la imagen, ya que con esto se maximizan o se hacen crecer las regiones con brillo de la misma. OpenCV proporciona la función *cv2.dilate()* con la cual se implantó esta fase. En la Figura 5 se muestra la imagen binaria dilatada.



Figura 4. Resultado de la deferencia absoluta entre la imagen de referencia y las de comparación.



Figura 5. Imagen binaria dilatada.

3.2.7 Obtención de contornos.

En la imagen binaria, un contorno es un conjunto de pixeles conectados entre sí que forman una figura que rodea el objeto. Son pixeles que tienen como vecinos a otros del mismo valor. Para detectar los contornos de la imagen, en esta fase se usó la función *cv2.findContours()*. Esta función

retorna en un arreglo las coordenadas de los contornos encontrados. En la Figura 6 se muestran los contornos de la imagen dilatada.

3.2.8 Creación del rectángulo en los contornos.

Esta etapa consiste en marcar con un rectángulo los contornos identificados en las imágenes del primer plano de la etapa anterior para indicar las zonas con movimiento. Esta acción se llevó a cabo usando las funciones *cv2.contourArea()* y *cv2.rectangle()*. La primera determina el área de los contornos. Si el área es igual o mayor a un valor configurado, la segunda función dibuja un rectángulo en el contorno. Esto descarta contornos pequeños, no deseados o no importantes, como por ejemplo contornos internos de una imagen. El valor mínimo del área de los contornos configurado es ajustable y depende de la aplicación y tipos de objetos a detectar. En este trabajo se estableció a 650. En la Figura 7 se muestra una de las imágenes de primer plano marcando con un rectángulo el área donde se detectó movimiento.

Posteriormente, los cuadros de las imágenes con los contornos marcados se almacenan en archivos cuyo nombre está compuesto por la hora cuando se detectó el movimiento. En la memoria micro SD de 64 GB, insertada en la tarjeta Arty Z7-10, se creó un directorio para cada día en el cual se almacenan los archivos indicados anteriormente. Finalmente, se invoca una rutina de retardo de 900 ms para repetir las fases anteriores del proceso, lo que permitirá marcar en cada segundo las imágenes donde exista movimiento.

4. Resultados y discusión

Se realizaron dos conjuntos de pruebas. El primero tuvo como objetivo determinar el tiempo de respuesta del sistema y la cantidad de imágenes o cuadros de la señal de video que se deben comparar en la segunda fase del algoritmo. Existe el compromiso entre el tempo de respuesta y la cantidad de imágenes, ya que entre mayor sea la cantidad de imágenes de comparación para generar el primer plano se obtienen mejores resultados y se descartan falsos positivos pero el tiempo de procesamiento aumenta. Para determinar la cantidad de imágenes a capturar usando el menor tiempo de procesamiento, se llevaron cabo seis pruebas, en la primera se usó una imagen y en las siguientes una más que la anterior hasta usar seis imágenes en la segunda fase del algoritmo. Los resultados mostraron, como era esperado, que el tiempo de procesamiento del sistema aumentó proporcionalmente como se muestra en la gráfica de la Figura 8.



Figura 6. Contornos de la imagen dilatada.

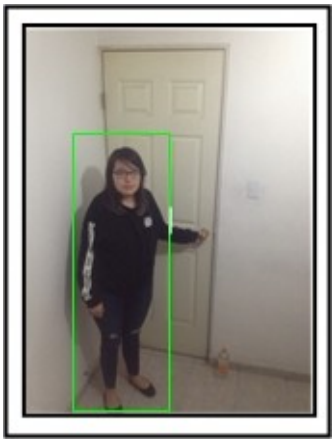


Figura 7. Imagen de primer plano marcando con un rectángulo las áreas donde se detectó movimiento.

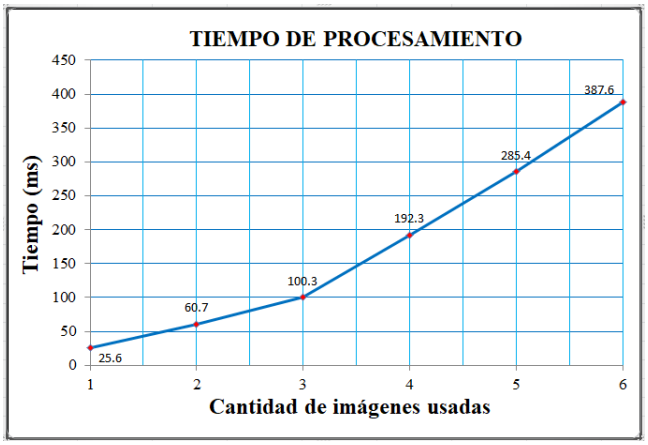


Figura 8. Tiempo de procesamiento del sistema.

Después de la tercera prueba, al usar más de tres imágenes, el tiempo de procesamiento crece aceleradamente hasta llegar a 387.6 ms. En base a estos resultados, se decidió usar tres imágenes en esta fase, ya que el tiempo de procesamiento, 100.3 ms, es aceptable para la aplicación y permite eliminar falsos positivos, es decir, objetos que pertenecen a la imagen de referencia o segundo plano, que se detectaron al usar una y dos imágenes para generar el primer plano. Por esta razón, al detectar movimiento y después de 900 ms el algoritmo se repite, dando oportunidad de realizar cada segundo el muestreo de la escena.

El objetivo del segundo grupo de pruebas fue determinar la dimensión del área del rectángulo a usar en la octava etapa de algoritmo. En estas pruebas se marcaron los

contornos con rectángulos. Se observó que los rectángulos cuya área fue menor a 650 son falsos positivos, objetos de la escena que no pertenecen a la persona en movimiento.

Si bien, el método de sustracción de fondo es sencillo de implantar y no es necesario que las personas u objetos cuyo movimiento sea detectado porten algo que los identifique ni está basado en la textura de la imagen, es sensible a las condiciones de iluminación. No obstante, en esta aplicación la cámara fija y la escena siempre esta iluminada o bien el CCTV cuenta con un sensor que ilumina el área al abrir la puerta de la sala de equipos.

5. Conclusiones

Se obtuvo un sistema de detección de movimiento en la puerta de acceso a las salas de equipo de un CPD usando el método de extracción de segundo plano. Considerando los resultados obtenidos, específicamente en el tiempo de respuesta del sistema, el sistema puede usarse en otras aplicaciones o ambientes de tiempo real ya que la cámara de video usada proporciona 30 cuadros por segundo, de los cuales se utilizan tres en el algoritmo implantado.

En caso de ser necesario reducir el tiempo de procesamiento, puede usarse un algoritmo del tipo MOG, basado también en la extracción de segundo plano, u otro más sofisticado cuyo tiempo de procesamiento sea mucho menor al usado en este trabajo, para lo cual es recomendable que sea implantado creando un overlay en PYNQ para aprovechar la ejecución de tareas en paralelo con los módulos de la tarjeta Arty 27-Z10. Por último, si en la puerta de acceso existe demasiado movimiento, se puede usar una tarjeta micro SD cuya capacidad sea mayor a 64 GB, lo que le permitirá almacenar una mayor cantidad de imágenes que en este trabajo sin realizar cambio alguno en el sistema.

6. Bibliografía

1. Chang V., Ramachandran M., “Towards Achieving Data Security with the Cloud Computing Adoption Framework”, IEEE Transactions on Services Computing, 9(1), 138-151 (2016).
2. Hu J., Lu R., “New requirements of information security protection on state grid Shanghai Municipal Electric Power Company Data Center compared with Disaster Recovery Center”, CIRED-Open Access Proceedings Journal, 2017(1), 2825-2826 (2017).
3. Norma ICREA Std-131-2019, https://icrea-international.org/wp-content/uploads/2019/08/Criterios_Generales_de_Certificacion.pdf.

4. TIA Standard, Telecommunications Infrastructure Standard for Data Centers ANSI/TIA-942-B-2017, Approved July 12, 2017, www.tiaonline.org, https://global.ihs.com/doc_detail.cfm?document_name=TIA%2D942&item_s_key=00414811.
5. Wang H., Chen Z., Zheng S., “Preliminary Research of Low-RCS Moving Target Detection Based on Ka-Band Video SAR”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 14(6), 811-815 (2017).
6. ElTantawy A., Shehata M. S., “KRMARO: Aerial Detection of Small-Size Ground Moving Objects Using Kinematic Regularization and Matrix Rank Optimization”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 29(6), 1672-1686 (2019).
7. Wang K., Zeng Z., Sun J., “Through-Wall Detection of the Moving Paths and Vital Signs of Human Beings”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 16(5), 717-721 (2019).
8. Cao X., Yang L., Guo X., “Total Variation Regularized RPCA for Irregularly Moving Object Detection Under Dynamic Background”, IEEE Transactions on Cybernetics, 46(4), 1014-1027 (2016).
9. Han H., Zhu J., Liao S., Lei Z., Li S. Z., “Moving Object Detection Revisited: Speed and Robustness”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 25(6), 910-921 (2016).
10. Chen P., Zheng L., Wang X., Li H., Wu L., “Moving Target Detection Using Colocated MIMO Radar on Multiple Distributed Moving Platforms”, IEEE Transactions on Signal Processing, 65(17), 4670-4683 (2017).
11. Yu X., Chen X., Huang Y., Zhang L., “Radar Moving Target Detection in Clutter Background via Adaptive Dual-Threshold Sparse Fourier Transform”, IEEE Access, 7(1), 58200-58201 (2019).
12. Kim Y., Sekhon S. S., “Detection of Moving Target and Localization of Clutter Using Doppler Radar on Mobile Platform”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 12(5), 1156-1160 (2015).
13. Yang J., Liu C., “Detection and Imaging of Ground Moving Targets With Real SAR Data”, IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(2), 920-932 (2015).
14. Mou X., Chen X., Su N.., “Motion classification for radar moving target via STFT and convolution neural network”, The Journal of Engineering, 2019(19), 6287-6290 (2019).
15. Li J., Pan Z. M., Zhang Z. H., Zhang H., “Dynamic ARMA-Based Background Subtraction for Moving Objects Detection”, IEEE Access, 7(1), 128659-128668 (2019).
16. Yang X. L., Wen G. J., Ma C. H., Hui B. W., “CFAR Detection of Moving Range-Spread Target in White Gaussian Noise Using Waveform Contrast”, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, 13(2), 282-286 (2016).
17. Wu Y., He X., Nguyen T. Q., “Moving Object Detection With a Freely Moving Camera via Background Motion Subtraction”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 27(2), 236-248 (2017).
18. Kim S., Yang D. W., Park H. W., “A Disparity-Based Adaptive Multihomography Method for Moving Target Detection Based on Global Motion Compensation”, IEEE Transactions on Circuits and Systems for Video Technology, 26(8), 1407-1420 (2016).
19. Ou X., Yan P., Zhang Y., Tu B., Zhang G., “Moving Object Detection Method via ResNet-18 With Encoder–Decoder Structure in Complex Scenes”, IEEE Access, 7(1), 108152-108160 (2019).
20. Gong T., Cheng Y., Li X., “Micromotion Detection of Moving and Spinning Object Based on Rotational Doppler Shift”, IEEE Microwave and Wireless Components Letters, 28(9), 843-845 (2018).
21. Zuo J., Jia Z., “Moving Target Detection Based on Improved Gaussian Mixture Background Subtraction in Video Images”, IEEE Access, 7(1), 152612-152623 (2019).

Red de sensores láser para protección de equipo de cómputo en un centro de datos

Vega-Luna, J. I.[1], Salgado-Guzmán, G. [1], Cosme-Aceves, J. F. [1], Tapia-Vargas, V. N. [1], Sánchez-Rangel, F. J. [1], Lagos-Acosta, M. A. [1]

[1]Área de Sistemas Digitales, Departamento de Electrónica, Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo 180, Col. Reynosa, Ciudad de México, 02200.

vlji@azc.uam.mx, gsg@azc.uam.mx, cajf@azc.uam.mx, vtapia@azc.uam.mx, fjsr@azc.uam.mx, mlagos@azc.uam.mx

1. Resumen

El objetivo de este trabajo fue desarrollar una red de sensores de distancia láser para detección de presencia en gabinetes de equipo de cómputo en un centro de datos. Se desarrolló una red inalámbrica compuesta por tres nodos remotos y un nodo central. Los nodos remotos se encuentran instalados en las puertas de los gabinetes, de forma tal que al detectar presencia capturan la fotografía de la persona u objeto y la transmiten al nodo central. Éste último se encarga de almacenar las fotografías enviadas por los nodos remotos y transmitirlas en un mensaje de alerta de WhatsApp a un teléfono móvil. En el nodo central se encuentra un servidor web que permite consultar las fotografías almacenadas. Las pruebas de la transmisión WiFi de la red mostraron que el alcance fue 42 metros sin línea de vista y el tiempo de respuesta fue 400 ns.

2. Introducción

En un centro de datos, o centro de procesamiento de datos (CPD), se encuentra instalado equipo de cómputo y telecomunicaciones de empresas e instituciones donde se almacena y procesa información de aplicaciones. La seguridad de la información y equipo es responsabilidad del CPD y los cuales deben estar disponibles casi todo, ya que la operación y productividad de clientes y usuarios dependen de ellos [1].

Los CDP están organizados en áreas, llamadas comúnmente bunkers, donde se ubica el equipo en operación. El acceso a estas áreas está controlado a través de diferentes mecanismos de seguridad. Solo está permitido el acceso a operadores, administradores y personal de mantenimiento. Todos los CPD cuentan con sistemas de video vigilancia permanente. Sin embargo, existen equipos cuyo acceso es sumamente restringido ya sea por el tipo de: información que almacenan o procesan, contrato del usuario, características del equipo y políticas de seguridad, entre otras razones. Solo personal autorizado puede abrir los gabinetes donde está instalado el equipo.

Todos los CPD son auditados periódicamente para contar con la certificación que les permite ofrecer servicios confiables y seguros a los clientes. Un aspecto que revisan las auditorías son los procedimientos de acceso a los bunkers y equipo y que en la actualidad exigen se realice remotamente desde la Internet [2].

El trabajo aquí presentado fue desarrollado a solicitud de una empresa operadora de centros de datos. El objetivo planteado fue contar con un sistema de detección de presencia en gabinetes de equipo de uso restringido. El sistema debe usar un detector que capture la fotografía de la persona y la transmita en un mensaje de alerta de WhatsApp al teléfono móvil del responsable de la operación y seguridad del CPD. El sistema debe contar con una interfaz de usuario a través de la cual pueda visualizarse desde la Internet las fotografías capturadas. En el CPD se encuentra instalado un punto de acceso WiFi cuya distancia al gabinete más lejano son 30 metros. Se solicitó un sistema confiable, de bajo costo, de respuesta rápida y que no necesite la instalación de cableado y no modifique el existente.

Tomando en cuenta lo solicitado, la solución propuesta fue una red inalámbrica de sensores de presencia compuesta de tres nodos remotos y uno central. Los nodos remotos se instalaron en el mecanismo de apertura de las puertas frontal, lateral derecha y trasera de un gabinete de equipo. Los nodos remotos se encargan de detectar la presencia de personas que frente a la puerta, capturar la fotografía y transmitirla al nodo central usando tecnología WiFi. No fue una opción usar un segmento Ethernet u otra tecnología alámbrica para transmitir la información al nodo central debido al requerimiento de no instalar cableado adicional o modificar el existente. El nodo central almacena las fotografías recibidas de los nodos remotos y las transmite con el mensaje de alerta de WhatsApp al teléfono móvil. La conexión del nodo central a la Internet es a través del punto de acceso WiFi.

Para elegir el tipo de comunicación inalámbrica de la red se consideró el uso de las tecnologías ZigBee, LoRa (Long Range), Bluetooth Low Energy (BLE) y WiFi. Las tres primeras se utilizan para implantar redes de bajo consumo de energía de sensores y actuadores. Las tecnologías ZigBee y LoRa se emplean para transmitir cantidades pequeñas de información y su ancho de banda es pequeño, 250 Kbps y de 0.3 Kbps a 50 Kbps, respectivamente [3]. La tecnología BLE tiene un ancho de banda de 32 Mbps. El alcance de los transceptores ZigBee es 100 metros, el de los transceptores LoRa es de varios kilómetros y existen transceptores BLE cuyo alcance son 100 metros nominalmente [4]. Considerando lo anterior, la opción adecuada fue utilizar una tarjeta de desarrollo de tamaño compacto que integre la mayor parte de recursos necesarios para implantar la red solicitada y una interfaz WiFi para comunicar los nodos de la red usando el punto de acceso instalado en el CPD [5].

Los nodos de la red se implantaron utilizando una tarjeta Huzzah32 ESP32. La razón principal de usar esta tarjeta fue porque puede programarse por medio del ambiente de desarrollo Arduino IDE o con Circuitpython. Para ambas opciones existe una gran cantidad de aplicaciones y bibliotecas desarrolladas por la comunidad de código abierto de fácil instalación, configuración y uso. La tarjeta Huzzah32 ESP32 fue seleccionada de un conjunto de tarjetas de desarrollo entre las cuales se encuentran la Arduino, la Pyboard y la Rapberry Pi por las siguientes razones: 1) La tarjeta Huzzah32 ESP32 cuenta con una interfaz de comunicación WiFi; 2) Escalabilidad, la

Huzzah32 ESP32 integra mayor cantidad de recursos hardware que las otras del mismo tipo, lo cual permite en el futuro adicionar funciones al sistema o crecer la red si lo solicita el CPD y 3) Es la tarjeta de menor costo de todas con la mayor cantidad de recursos de hardware ofreciendo buena relación costo/beneficio.

Los sistemas de detección de personas y objetos que utilizan técnicas no invasivas, tradicionalmente están basados en sensores infrarrojos pasivos, o PIR, y ultrasónicos. Los últimos años, el uso de señales de radio y dispositivos de rango y detección de luz (LIDAR-Light Detection and Ranging) ha sido una línea de investigación interesante aplicada principalmente a la localización, reconocimiento de gesticulaciones y cuidado de la salud [6]. El empleo de micro ondas y ondas milimétricas para la detección remota, que anteriormente se empleaban en aplicaciones de distancias grandes, ha sido portado a las aplicaciones de medida de longitudes pequeñas para la detección y clasificación de personas y objetos y para determinar propiedades del cuerpo humano. Los resultados de estas investigaciones han sido sistemas y dispositivos de detección a través de paredes (TTW-Through-The-Wall) utilizando señales de WiFi en situaciones de emergencia o en edificios colapsados [7]. De manera similar, se han realizado aplicaciones para la detección de presencia y localización de personas basados en algoritmos que usan la alteración y la información del canal de transmisión de señales WiFi [8]. Los trabajos realizados recientemente usan también técnicas de radar para medir el tiempo que tarda la señal enviada a un objeto o al cuerpo humano tanto en reposo como en movimiento. Esto se ha hecho con el fin de detectar presencia de personas usando la respiración y ritmo cardiaco a través del efecto Doppler para aplicaciones médicas, de rescate y seguridad [9].

Los dispositivos LIDAR determinan la distancia desde un emisor láser a una persona u objeto usando pulsos del láser para medir el tiempo que tardan en retornar. Las últimas aplicaciones que utilizan este tipo de dispositivos han sido usadas principalmente para: estimar la altura de la vegetación y árboles en selvas y bosques [10], sistemas submarinos [11], captura y procesamiento de imágenes aéreas [12], reconstrucción de escenas 3D [13], navegación de vehículos autónomos [14], análisis de calidad del agua [15] y aeronáutica y lanzamiento de cohetes y satélites [16]. No se ha realizado un sistema similar al aquí presentado para un centro de datos.

Las ventajas y aportaciones de este trabajo son las siguientes: 1) El sistema no es intrusivo y es de fácil instalación, ya que la comunicación empleada entre los módulos del sistema es inalámbrica y no se modificó la infraestructura del cableado del CPD ni se colocó cableado adicional en el gabinete que pueda interferir con los equipos ahí ubicados; 2) Permite al encargado de la operación y seguridad del CPD reaccionar oportunamente ante cualquier intento de vulnerabilidad recibiendo la notificación cuando sucede el evento; 3) Es adicional a los sistemas de video vigilancia existentes en todos los CPD los cuales no cuentan con la posibilidad de enviar alertas ante la presencia de personas en gabinetes de equipo de misión crítica ni permiten visualizar la fotografía de la persona desde la Internet y 4) La tecnología usada es de reciente creación, las herramientas software usadas son de código abierto lo cual redujo el costo del sistema y cumplir con los requerimientos solicitados.

3. Condiciones experimentales

La metodología utilizada en el desarrollo de la red consistió en dividirla en tres partes: los nodos remotos, el nodo central y la interfaz de usuario. Posteriormente, se diseñó e implantó el sistema seleccionando los elementos adecuados de acuerdo a los requisitos indicados por el CPD. En la Figura 1 se muestra el diagrama funcional de la solución creada.

3.1 Los nodos remotos.

La mayoría de los gabinetes de equipo de un CPD cuentan con tres puertas, razón por la cual se construyeron tres nodos remotos, el primero se instaló en la puerta frontal de cómputo, el segundo en la puerta lateral derecha y el tercero en la puerta trasera. Los nodos fueron ubicados cerca de la manija de apertura, de forma tal que puedan detectar cuando se intenta abrir la puerta correspondiente como se muestra en la Figura 2. El diseño compacto de los nodos remotos permite que puedan moverse y reubicarse para ajustar su posición fácilmente en caso necesario. Los nodos remotos están formados por la tarjeta Huzzah32 ESP32, el sensor de distancia y la cámara de video como se muestra en la arquitectura de la Figura 3. La función de estos nodos es capturar la fotografía cuando una persona se encuentra a una distancia menor o igual a 30 centímetros de la manija de las puertas del gabinete y transmitirla al nodo central.

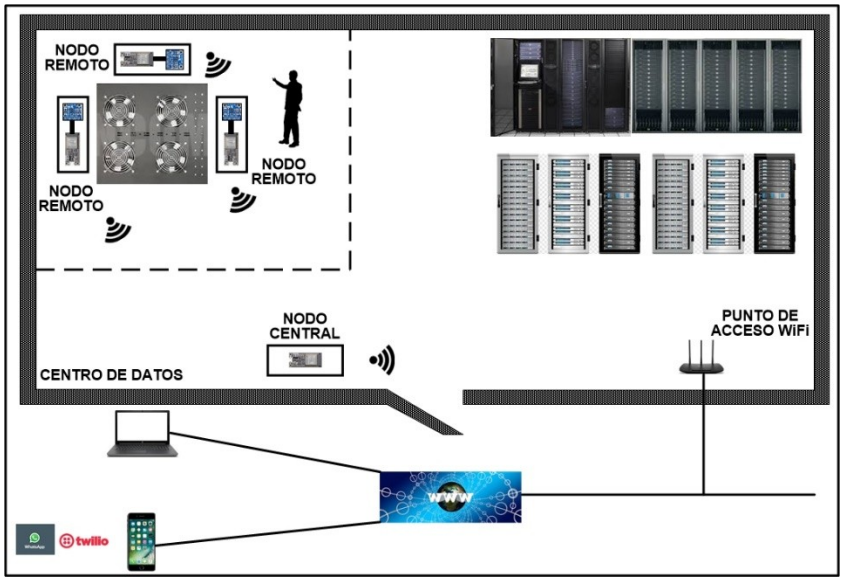


Figura 1. Diagrama funcional de la red inalámbrica de sensores láser

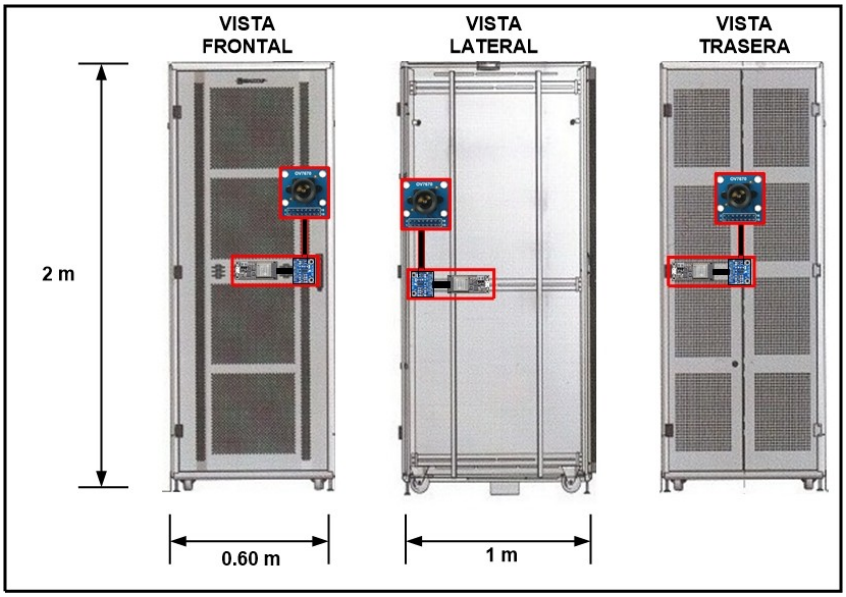


Figura 2. Ubicación de los nodos remotos en el gabinete de equipo

La tarjeta Huzzah32-ESP32 cuenta con los recursos requeridos en el diseño de los nodos remotos reduciendo de esta forma el tamaño y costo de los mismos. Los principales recursos de esta tarjeta son los siguientes: microcontrolador Tensilica LX6 de dos núcleos a 240 MHz, memoria flash de 4 MB, memoria RAM de 520 KB, interfaces WiFi 802.11b/g/n, Bluetooth clásico y LE con antena integrada, 3 puertos UART, 3 puertos SPI, 2 puertos I^2C, 25 entradas/salidas de propósito general (GPIO-General Purpose Input/Output) y un cargador para batería de ion de litio.

El sensor de distancia de los nodos remotos es el dispositivo VL53L0X, también denominado sensor de distancia micro-LIDAR de tiempo de vuelo. Este dispositivo es un módulo de rango de nueva generación que permite determinar la distancia desde un láser emisor a un objeto o superficie por medio del tiempo de vuelo, o tiempo que tarda la luz en retornar al sensor. El VL53L0X está integrado en el encapsulado más pequeño existente en el mercado y emite un haz de luz estrecho.

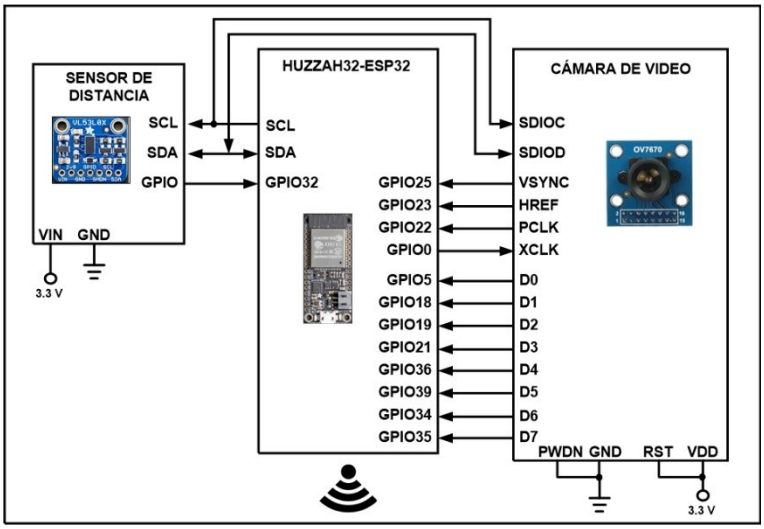


Figura 3. Arquitectura de los nodos remotos

A diferencia de otros dispositivos de medida de distancia, el VL53L0X proporciona la medida con excelente exactitud sin importar la reflectividad del objeto o persona. Usa tecnología cuyo componente principal es un arreglo de diodos de avalancha de fotones simples (SPAD-Single Photon Avalanche Diodes). La luz del láser es generada por un emisor de superficie de cavidad vertical (VCSEL-Vertical Cavity Surface Emitting Laser) de 940 nm acoplado con filtros infrarrojos e invisible al ojo humano. A diferencia de sonares basados en el reflejo de ondas ultrasónicas, el cono de luz estrecho del VL53L0X le permite detectar objetos hasta 2 metros de distancia, con alta inmunidad a la luz del ambiente y diafonía. A diferencia de sensores infrarrojos que miden la cantidad de luz que retorna, el VL53L0X es más preciso y no presenta problemas de linealidad o imagen doble que impidan determinar si el objeto se encuentra muy lejos o muy cerca. Permite medir distancia independientemente de la reflectancia del objeto y no estimar la distancia midiendo la cantidad de luz reflejada en el objeto, la cual es influenciada significativamente por el color y tipo de superficie. Mide el tiempo que tarda la luz en viajar y retornar del objeto, o tiempo de vuelo. Combina en un encapsulado un emisor IR y un sensor de rango.

El VL53L0X es un dispositivo I^2C que utiliza la línea de reloj SCL y la de datos SDA del bus I^2C para comunicarse con un controlador y compartir el bus con otros dispositivos cuando no existan colisiones en las direcciones. La dirección I^2C por defecto del VL53L0X es 0x29 la cual puede cambiarse por software cuando en el bus existan otros esclavos. La tarjeta en la que se encuentra montado el sensor VL53L0X cuenta con una terminal de salida GPIO, mediante la cual indica que la medida de distancia se encuentra lista en el bus I^2C. En los nodos remotos esta terminal se conectó a una terminal GPIO, configurada como entrada, de la tarjeta Huzzah32 ESP32 y las terminales SCL y SDA se conectaron a las del mismo nombre de la Huzzah32. El fabricante del sensor especifica que, dependiendo de la luz del ambiente y distancia, la exactitud de la medida será de 3 a 12%. Entre mejor sea la iluminación, se obtendrán mejores resultados, sin embargo, es necesario realizar pruebas debido a que los objetos absorben la luz láser.

En la configuración del VL53L0X se establecen dos parámetros: el tiempo de medida y el modo de rango. El primero indica la velocidad para obtener la medida e influye en la exactitud del sensor. Para usar una velocidad alta y obtener una medida rápida con menos exactitud se puede usar un tiempo de 20 ms, para una velocidad pequeña y una medida más exacta se puede usar un tiempo de 200 ms. El tiempo de medida por defecto es 33 ms, con que se obtiene un buen compromiso entre velocidad y exactitud. Se puede seleccionar uno de tres modos de rango: simple, el sensor realiza solo una medida; continuo, realiza medidas de manera continua, en cuanto termina una medida inicia la siguiente sin retardo; y con temporizador, cuando termina una medida inicia la siguiente después de un retardo definido.

El fabricante del sensor VL53L0X proporciona un conjunto de API que consiste de funciones en lenguaje C las cuales se utilizan para inicializar y calibrar el sensor, así como para establecer la exactitud, modo de rango e inicio de la medida. En los nodos remotos el VL53L0X se configuró para trabajar con el tiempo de medida por defecto y modo de rango continuo de manera que se encuentra permanentemente detectando presencia.

La cámara de video utilizada en los nodos remotos es el módulo OV7670 de 0.3 Megapixeles. Este módulo contiene un sensor de imágenes de bajo voltaje CMOS que consiste de un circuito que integra una cámara VGA y un procesador de imágenes en un encapsulado pequeño para mejorar la calidad de las mismas y corregir defectos reduciendo o eliminando ruido y manchas de fuentes de electricidad o luz y producir imágenes claras de color estable.

El módulo OV7670 tiene una resolución de 640x480 VGA, puede generar hasta 30 cuadros por segundo, proporcionando imágenes digitales de 8 bits en un amplio rango de formatos controlados a través de la interfaz estándar denominada bus de control de cámara serie (SCCB-Serial Camera Control Bus) compatible con el bus I^2C. El sensor del módulo realiza automáticamente la calibración que consiste de las siguientes acciones: control de exposición, de tono, gamma, ganancia, balance de blancos, mejora de bordes y saturación de color, lo cual es ideal en aplicaciones con ambientes con poca iluminación.

Las características técnicas de este módulo son las siguientes: cuenta con un regulador de voltaje de alimentación de 3.3 V, consume menos de 20 µA y tiene un ángulo de visión de 25º. La configuración y operación de la cámara se realiza a través de comandos y datos transmitidos en el bus SCCB. Este bus está compuesto por las líneas siguientes: SCL y SDA, conectadas al bus I^2C de la tarjeta Huzzah32-ESP32; D0 a D7, salidas por la cuales el sensor entrega la imagen en 8 bits; XCLK entrada que proporciona la señal de reloj externa al módulo; salidas de temporización, VSYNC de sincronía vertical, HREF de dato valido y PCLK de reloj de pixeles que se activan cuando la cámara entrega la imagen. Las líneas D0 a D7 y las de temporización se conectaron a terminales GPIO de la tarjeta Huzzah32-ESP32.

La programación de la tarjeta Huzzah32-ESP32 de los módulos remotos se realizó usando el ambiente de desarrollo de Arduino IDE y ejecuta las siguientes acciones: inicializa el sensor VL53L0X, la interfaz WiFi y el módulo OV7670. A continuación, entra a un ciclo continuo esperando detectar presencia. Cuando detecta presencia a una distancia igual o menor a 30 centímetros envía el comando correspondiente al módulo OV7670 para capturar la imagen en formato JPEG y

transmitirla, por medio de la interfaz WiFi, al nodo central. Para desarrollar esta programación se usaron las bibliotecas *Adafruit_VL53L0X.h* y *esp_camera.h*. En particular se invocaron las funciones siguientes: *Serial.println(measure.RangeMilliMeter)*, para obtener del VL53L0X la distancia al objeto en milímetros; *esp_camera_init()*, para la inicialización de la cámara y *esp_camera_fb_get()*, para capturar la imagen.

3.1 El nodo central.

De manera similar a los nodos remotos, el central se implantó utilizando la tarjeta Huzzah32-ESP32 y se incorporó un módulo de tarjeta SD. La comunicación entre la Huzzah32-ESP32 y el módulo de tarjeta SD utiliza el protocolo SPI, razón por la cual las terminales MISO, MOSI y SCLK del módulo se conectaron al bus de uno de los puertos SPI de la tarjeta, mientras que la terminal CS del módulo se conectó a la terminal GPIO0 configurada como salida tal como se muestra en el diagrama de bloques de la arquitectura del nodo central de la Figura 4. El nodo central se encarga de recibir la siguiente información de los nodos remotos cuando éstos detectan la presencia de una persona u objeto: la fecha y hora, el archivo JPEG de la fotografía capturada y el identificador del nodo. En la memoria SD se creó un directorio para cada nodo remoto y en cada directorio un subdirectorio nombrado con la fecha para almacenar el video enviado por cada módulo remoto.

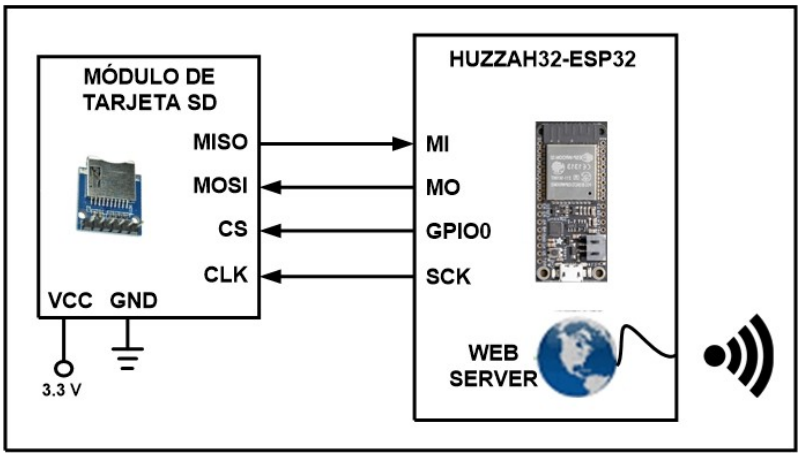


Figura 4. Arquitectura del nodo central

Las funciones del nodo central se implantaron programando la tarjeta Huzzah32 para realizar las actividades siguientes: configura la terminal GPIO0 y el puerto SPI e inicializa la interfaz WiFi. A continuación, invoca la función que arranca el servidor web la cual puede ser interrumpida al recibir, por medio del puerto SPI, la información de los nodos remotos. La rutina de servicio de la interrupción se encarga de leer la información del puerto SPI, trasmitirla en un mensaje de alerta de

WhatsApp al teléfono móvil a través de la plataforma de servicios Twilio y almacenar en la memoria SD la fotografía en un archivo cuyo nombre usa el formato ID-fecha-hora.JPG. La programación del nodo central se realizó usando las siguientes bibliotecas de funciones de código abierto: *WiFi.h* para realizar la comunicación con la interfaz WiFi, *SPI* para el manejo del protocolo SPI, *SD* para acceder la memoria SD y *WebServer.h* para implantar el servidor web. Particularmente se emplearon las siguientes funciones: *SD_MMC.begin()* para inicializar la memoria SD; *fs.open(path.c_str()*, *FILE_WRITE)* para almacenar el archivo JPG y *dataFile.read()* para realizar la lectura del archivo JPG.

3.3 La interfaz de usuario.

La interfaz de usuario desarrollada consiste de una página creada con HTML desplegada en la computadora cuando se realiza la conexión al servidor web del nodo central. La página principal de la interfaz contiene un botón para cada nodo remoto junto al cual se muestra la fotografía, hora y fecha de la última persona detectada en el gabinete del nodo, tal y como se indica en la Figura 5. Al presionar uno de los botones se accede a la información almacenada en los subdirectorios de la memoria SD. La interfaz cuenta también con un botón de *Configuración*, el cual permite establecer el número del teléfono móvil al que se transmite el mensaje de alerta de WhatsApp.

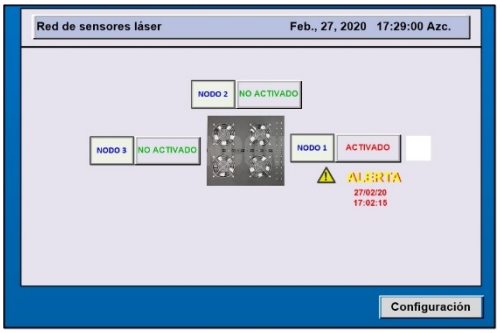


Figura 5. Interfaz de usuario

4. Resultados y discusión

El gabinete en el que se instalaron los nodos remotos de la red se encuentra aislado en el CPD, los gabinetes más cercanos se encuentran más allá de los 5 metros, por lo que la luz de los sensores de distancia no es interferida y no rebota en los gabinetes. Sin embargo, antes de realizar las pruebas de la red se solicitó ajustar los sensores para que la distancia máxima medida sea 1.80 metros, ya que en caso de necesitar mover el gabinete, en el que se encuentran instalados los nodos remotos, a otro lugar del CPD, el gabinete más cercano no podrá estar ubicado a menos de 1.90 metros. Una vez ajustados los sensores se procedió a llevar a cabo dos conjuntos de pruebas. El primer conjunto tuvo como objetivo determinar el tiempo de respuesta de la red realizando 50 pruebas, ubicando una persona a una distancia diferente en un nodo remoto en cada prueba. En todas las pruebas la distancia fue menor a 30 centímetros. Para realizar estas pruebas se ejecutaron dos programas, el primero en el nodo remoto para registrar la hora cuando se detectó presencia y el segundo se ejecutó en el nodo central para registrar la hora cuando el nodo almacenó la información transmitida por el nodo remoto en la memoria SD. La diferencia entre ambos registros fue la que se consideró como el tiempo de respuesta, la cual fue de 400 ns en promedio.

El segundo conjunto consistió de 100 pruebas que tuvieron como fin determinar la exactitud de la medida de distancia de los nodos remotos. El fabricante del sensor de distancia indica que el valor de la exactitud depende del tiempo de medida configurado. Considerando que el tiempo de medida usado es 33 ms, la exactitud nominal del sensor es 4 % en interiores. En la realización de estas pruebas se colocaron 100 personas a distancias entre 10 y 180 centímetros de un nodo remoto y se ejecutó un programa en el nodo para mostrar en el IDE de Arduino la distancia medida. En cada prueba se midió la distancia a la cual se colocó la persona y se tomó como referencia o medida real. A continuación, se consideró como medida experimental la mostrada en el IDE de Arduino para determinar que la exactitud real de la medida reportada por el nodo es 1.5% en promedio. Durante las pruebas anteriores, el gabinete donde se instalaron los nodos remotos se localizó a 30 metros del nodo central y no se presentaron problemas en la comunicación WiFi de la red. No obstante, para determinar el alcance de la misma se ubicó uno de los nodos remotos a distancias mayores a la anterior. Los resultados obtenidos mostraron que a 32 metros el nivel de intensidad (RSSI-Received Signal Strength Indicator) de la señal WiFi cae a -72 dBm y continua haciéndolo hasta -90 dBm cuando la distancia es 42 metros y el enlace se pierde como se indica en la gráfica de la Figura 6. Para obtener el valor del RSSI se ejecutó un programa que invoca la función *getStrength(numberPoints)* de la biblioteca *WiFi.h*.

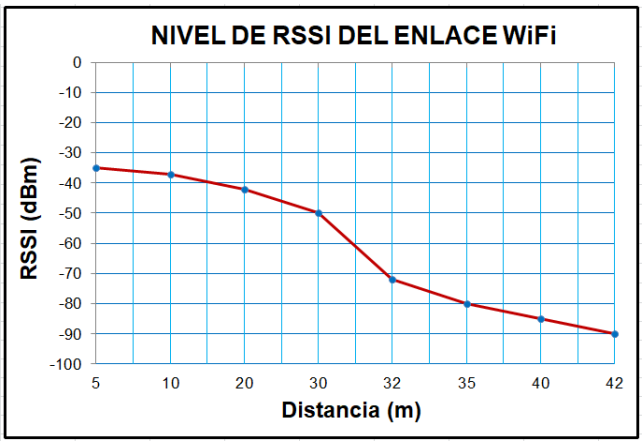


Figura 6. Nivel de RSSI del enlace WiFi de la red

5. Conclusiones

A partir de los resultados logrados se obtuvieron las conclusiones siguientes: 1) La instalación de los nodos de la red no es un proceso intrusivo, ya que no es necesario instalar cableado adicional en el CPD ni en los gabinetes que pueda interferir con el cableado del equipo; 2) La solución creada satisface una necesidad real que cumple con las características solicitadas por el CPD y las instituciones de auditoria del mismo; 3) La red puede crecer de manera fácil para instalar nodos remotos en otros gabinetes. Solo es necesario realizar ajustes en la programación de la interfaz de usuario que consideren los nodos adicionales y 4) Se pudo usar un detector de presencia de costo mucho menor al utilizado en los nodos remotos, como por ejemplo uno de tecnología PIR, lo cual no se hizo debido a que no puede ajustarse la distancia de detección a 30 centímetros o menos como lo solicitó el CPD. En caso de instalar nodos remotos en otros gabinetes debe considerarse ubicarlos a una distancia mayor a 1.80 metros de objetos que reflejen la luz láser del sensor. Si es necesario incrementar el alcance de la red, puede usarse un repetidor o ruteador WiFi.

6. Bibliografía

22. Chen W., Liu B., Paik I., "QoS-Aware Data Placement for MapReduce Applications in Geo-Distributed Data Centers", IEEE Trans. on Eng. Management, 1-17 (2020).
23. Baig S., Iqbal W., Berral J. L., "Real-Time Data Center's Telemetry Reduction and Reconstruction Using Markov Chain Models", IEEE Systems Journal 13(4), (2019).
24. >>>>>>>>>>>>>
25. Rofoee B. R., Zervas G., Yan Y., Anastasopoulos M., "Hardware virtualized flexible network for wireless data-center optical interconnects", IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 7(3), A526-A536 (2015).
26. Han C., Chen L., Wang W., "Compressive Sensing in Wireless Powered Network: Regarding Transmission as Measurement", IEEE Wireless Communications Letters. 8(6), 1709-1712 (2019).

27. Tzanakaki A., Anastasopoulos M. P., Simeonidou D., "Converged optical, wireless, and data center network infrastructures for 5G services", IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking, 11(2), A111-A122 (2019).
28. Wu C., Yang Z., Zhou Z., Liu X., "Non-Invasive Detection of Moving and Stationary Human With WiFi", IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 33(11), 2329-2342 (2015).
29. Di Domenico S., De Sanctis M., Cianca E., "WiFi-based through-the-wall presence detection of stationary and moving humans analyzing the doppler spectrum", IEEE Aerospace and Electronic Systems Magazine, 33(5-6), 14-19 (2018).
30. Zhou R., Lu X, Zhao P., Chen J., "Device-Free Presence Detection and Localization With SVM and CSI Fingerprinting", IEEE Sensors Journal, 17(23), 7990-7999 (2017).
31. Nanzer J. A., "A Review of Microwave Wireless Techniques for Human Presence Detection and Classification", IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques, 65(5), 1780-1794 (2017).
32. Paris C., Bruzzone L., "A Three-Dimensional Model-Based Approach to the Estimation of the Tree Top Height by Fusing Low-Density LiDAR Data and Very High Resolution Optical Images", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(1), 467-480 (2014).
33. Matteoli S., Zotta L., Diani M., "POSEIDON: An Analytical End-to-End Performance Prediction Model for Submerged Object Detection and Recognition by Lidar Fluorosensors in the Marine Environment", IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 10(11), 5110-5133 (2017).
34. Zhang Y., Xiong X., Zheng M., "LiDAR Strip Adjustment Using Multifeatures Matched With Aerial Images", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 53(2), 976-987 (2015).
35. Bybee T. C., Budge S. E., "Method for 3-D Scene Reconstruction Using Fused LiDAR and Imagery From a Texel Camera", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 57(11), 8879-8889 (2019).
36. Kim T. H., Park T. H., "Placement Optimization of Multiple Lidar Sensors for Autonomous Vehicles", IEEE Transactions on Intelligent Transportation Systems, Early Access Article, 1-7 (2019).
37. Pan Z., Glennie C. L., Fernandez-Diaz J. C., "Fusion of LiDAR Orthowaveforms and Hyperspectral Imagery for Shallow River Bathymetry and Turbidity Estimation", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 54(7), 4165-4177 (2016).
38. Magruder L. A., Brunt K. M., "Performance Analysis of Airborne Photon-Counting Lidar Data in Preparation for the ICESat-2 Mission", IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 56(5), 2911-2918 (2018).

Solucion Beltsville Thawing (Bts) Permite Mantener La Viabilidad En Los Espermatozoides De Cerdo Incubados Con Nanopartículas Poliméricas De Quitosan. (Resultados Preliminares)

Ramírez C. S.[1], Días T. R.[2], Jardón X. S.[2], Juárez L. N. O.[3], Gutiérrez P. O.[4],

Córdova I. A.[5] & Juárez M. M-L.[6]

[1] Programa de posgrado MCPSA-UNAM, [2] Facultad de Estudios Superiores Cuautitlán,

[3] Departamento de Genética y Bioestadística, FMVZ-UNAM, [4] CEIEPP, FMVZ-UNAM,

[5] UAM-Xochimilco & [6] Departamento de Morfología, FMVZ-UNAM

silraca1983@gmail.com, diaztorres_r@hotmail.com, mvz.jardon@gmail.com, noeorlando@comunidad.unam.mx, koala630816@yahoo.com.mx, acordova@correo.xoc.uam.mx, & luerfco@unam.mx

1.- Resumen

Las nanopartículas poliméricas de quitosán (NPPs-Q) han generado un interés importante en el campo de la reproducción, sin embargo los resultados sobre la viabilidad celular es controversial, además de existir pocos trabajos sobre los efectos en los espermatozoides, por ello éste trabajo evaluó la citotoxicidad in vitro de las NPPs-Q sobre la viabilidad espermática del cerdo. Los espermatozoides se incubaron a una concentración de $35x10^6$cel/ml a 37°C con tres diferentes tipos de NPPs-Q a cuatro diferentes concentraciones, en dos medios de incubación (PBS o BTS), durante 1, 2 y 3 horas. Se encontró un detrimento (*$p<0.05$)* de la motilidad, viabilidad e integridad acrosomal asociado al tipo de NPPs-Q, medio de incubación, concentración y tiempo de incubación. Los resultados muestran que para mantener la viabilidad de los espermatozoides de cerdo es conveniente utilizar NPPs-Q sin filtrar a concentraciones menores de $50 \mu l/ml$en un medio con BTS por menos de una hora para poder utilizarlo en procedimientos de crioconservación.

2.- Introducción

El uso de nanopartículas (NPs) es una herramienta importante en el campo de la medicina y particularmente en el campo de la reproducción, ya que se han utilizado como portadoras de sustancias exógenas como fármacos, ADN, proteínas, entrega selectiva de cargas moleculares, selección de espermatozoides viables y crioconservación de los mismos[1,2,3,4,5].

Hasta el momento existe poca información concluyente sobre los efectos tóxicos de las NPs en la salud reproductiva, dado que existe controversia en diferentes estudios. Se sabe que los factores relacionados a la toxicidad en las células están relacionados con el tamaño, composición química y agentes de recubrimiento; todo ello asociado a la capacidad de internalización de las NPs. En diversos estudios se ha descrito que un tamaño “pequeño” favorece el aumento en su toxicidad

facilitando su internalización a la célula por alguno de los siguientes mecanismos, como la ósmosis, fagocitosis, pinocitosis o por canales iónicos. Ésta internalización puede generar estrés oxidativo, inflamación y daño en el ADN, especialmente con las NPs elaboradas con materiales inorgánicos como son el oro o zinc[1,6], por ello se han utilizado otros materiales de origen orgánico como por ejemplo el quitosán, generando mucho interés por sus propiedades bactericidas y antioxidantes[7,8].

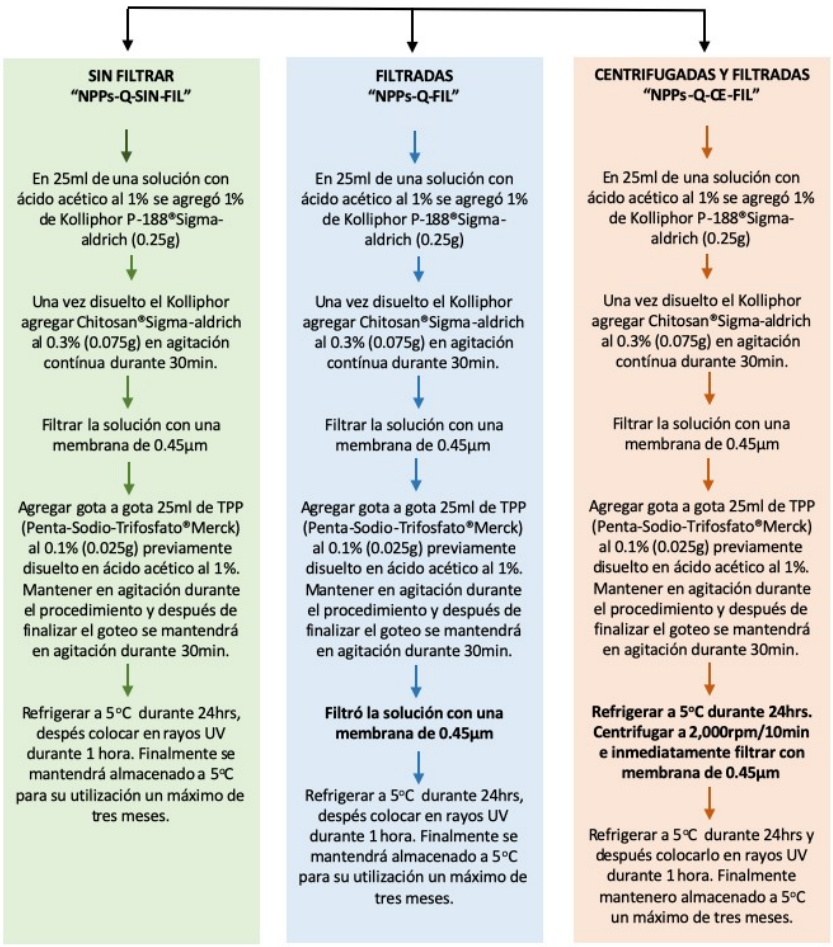
Además se ha descrito que las NPs elaboradas a partir de quitosán no modifican la estructura celular (actina-F) ni la viabilidad en cultivos celulares a dosis menores de 50µl/ml (células MARC-145, cultivadas por 72h)[9], incluso se han utilizado como agentes crioprotectores en espermatozoides de cerdo a dosis de 100µl/ml[4]. También se ha propuesto que el quitosán como recubrimiento de NPs con centro lipídico puede facilitar la internalización en espermatozoides de bovino, pero con un detrimento de la motilidad de las células[3]. Y en el caso de los espermatozoides de humano se ha observado que los oligos de quitosán no afectan la motilidad, ni existen alteraciones morfológicas de la membrana ni del ADN, pero sí una disminución de los radicales libres[10].

La crioconservación de semen de verraco sigue significando una limitación tecnológica importante para el desarrollo de la reproducción de esta especie, lo que demanda que se realice un nuevo enfoque en el ámbito de la criobiología espermática que permita utilizar nuevas alternativas, como el empleo de las nanopartículas poliméricas de quitosán (NPPs-Q) y que permitan corroborar si su utilización puede ofrecer mayor crio resistencia a los espermatozoides durante el proceso de congelación-descongelación. Dado que la citotoxicidad esta asociada a las características propias de los componentes de las NPPs es indispensable conocer los efectos y determinar las concentraciones ideales para utilizarlas como parte de los diluyentes de crioconservación, ya sea como moléculas crioprotectoras o como acarreadoras de otras molélulas crioprotectoras.

3.- Condiciones experimentales

3.1 Elaboración de nanopartículas poliméricas de quitosán (NPPs-Q): Para la formación de las NPPs se utilizó el método de gelificación iónica con tripolifosfato (TPP), el cual se agregó gota a gota[11] a una temperatura ambiental promedio de 21°C. El quitosán utilizado fue de bajo peso molecular (50-190KDa Sigma-Aldrich®) y con un porcentaje de desacetilación del 75%. Se realizaron tres modificaciones al procedimiento de elaboración de las NPPs-Q para obtener tres grupos: 1.- Sin filtrar (NPPs-Q-SIN FIL), 2.- Filtrada (NPPs-Q- FIL) y 3.- Centrifugada y filtrada (NPPs-Q-CEN- FIL) (ver **Figura 1**).

Figura 1: Procedimiento para elaborar NPs de Quitosán



3.2 Medición de nanopartículas: El tamaño de las NPs se evaluaron con la técnica de Dispersión dinámica de luz (DLS) con la utilización del Coulter Scientific Instruments N4Plus.

3.3 Colección de semen: Se obtuvieron cinco eyaculados de cuatro sementales sexualmente maduros, pertenecientes al Centro de Enseñanza, Investigación y Extensión de Producción Porcina (CEIEPP) de la Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia de la UNAM. Los eyaculados se recolectaron por medio de la técnica de la mano enguantada, colectando únicamente la fracción rica en espermatozoides, la cual se filtró con una doble gasa estéril. Los eyaculados se diluyeron 1:1

(Vol :Vol) en medio BTS (Beltsville Thawing Solution) para su transporte al laboratorio de investigación del Departamento de Morfologia de la FMVZ en una caja de poliuretano, el diluyente permitió la conservación de las células a 16º C durante 3 días[12]. En el laboratorio se evaluó la concentración espermática (por medio de un hematocitómetro) y la motilidad progresiva; se incluyeron en el estudio solo las muestras con una motilidad ≥ al 70%.

3.4 Prueba de toxicidad: Cada unidad experimental consistió en colocar una muestra de semen y centrifugar a 1500rpm/10min para eliminar líquido seminal y diluyente de conservación, después se reconstituyó la pastilla espermática con 1ml de medio de incubación, ya sea PBS (DPBS™Gibco) o BTS (BTS®KUBUS,S.A.) a una concentración de $35x10^6$ células/ml, la incubación fue durante 3 horas a 37ºC y cada evaluación se realizó durante cada hora. Para la evaluación de las NPPs-Q se utilizaron diferentes concentraciones (40, 50, 100, y 150 $\mu l/ml$) para cada tipo de nanopartícula. Se consideraron cuatro tiempos de evaluación durante la incubación, tiempo cero (T0) antes de agregarles las NPPs-Q, una hora de exposición con las NPPs-Q (T1), dos horas de exposición (T2) y finalmente a las tres horas (T3) de exposición durante la incubación.

3.5 Evaluación de las muestras: Durante cada uno de los tiempos de incubación se tomaron tres alícuotas de $10\mu l$ para evaluar las siguientes características: integridad de la membrana con la tinción de eosina-nigrosina, integridad del acrosoma con la tinción azul brillante de Coomassie[11] y el porcentaje de motilidad progresiva, con una valoración subjetiva realizada por el mismo indivíduo utilizando un microscopio óptico invertido de la marca Nikon, Type 120 y con Thermo plate Tokai Hit Nikon Inc regulado a 37ºC. En cada medición se contó un total de 100 células.

3.6 Análisis estadístico: Se realizó un análisis de varianza para medidas repetidas con un diseño factorial de 3x2x5x4 con un mínimo de tres réplicas, de forma complementaria se aplicó el test de esfericidad de Mauchly´s para verificar si las varianzas del factor tiempo eran homogéneas. El análisis se realizó con el programa R-Studio versión 3.6.3 (ver **tabla 1**).

Tabla 1. *Factores y niveles utilizados en el diseño factorial de 3X2X5X4*

FACTORES	NIVELES
Nanopartícula:	NPP-Q-SIN-FIL, NPP-Q-FIL y NPP-Q-Ce-FIL
Medio de incubación:	PBS y BTS
Concentración:	0, 40, 50, 100 y 150 $\mu l/ml$
Tiempo:	T0, T1, T2 y T3

4.- Resultados y discusión

El análisis por DLS mostró diferencias en el promedio y porcentaje de los tamaños obtenidos para cada tipo de NPPs-Q (ver **tabla 2)**, en color gris se resaltan los tamaños con mayor porcentaje, siendo de menor a mayor las NPs Ce-FIL(94.3% con 8.4nm), SIN-FIL (72.1% con 14.3nm) y las NPs FIL (86.9% con un rango de 205-349nm). Ésta variación en el tamaño efectivamente puede encontrarse desde decenas a cientos de nanómetros con la técnica de gelificación iónico con TPP[13].

Tabla 2. *Tamaños de las NPs obtenidos con DLS*

	Tipo de NPPs	I.P.	Promedio	DS	Porcentajes			
NPPs-Q	SIN FILTRAR (**SIN-FIL**)	0.682	35.3nm	85.6nm	**72.1% 14.3nm**	20.9% 24.4nm	3% 205.4nm	3.9% 349nm
	FILTRADO (**FIL**)	0.76	270.6nm	115.5nm	11% 120.4nm	**40.6% 205nm**	**46.3% 349.2nm**	2.1% 594.6nm
	CENT/FILT (**Ce-FIL**)	0.617	10.7nm	28.2nm	**94.3% 8.4nm**	5% 14.3nm	0.4% 205nm	0.3% 349.2nm

En la **tabla 3** se observa un resumen del análisis de varianza que muestra las diferencias significativas a una $p<0.05$ para los diferentes factores y sus interacciones en cada una de las variables respuesta (Motilidad, Viabilidad e Integridad acrosomal). En general se puede observar que existe un efecto de la interacción de al menos la combinación de 3 factores para la motilidad y viabilidad (marcado en color gris), y para la integridad acrosomal se observa la interacción de dos factores y para un solo factor (marcados en color gris).

Tabla 3. *Resumen del análisis de varianza de los diferentes factores evaluados y sus combinaciones para cada una de las variables respuesta (Motilidad, Viabilidad e Integridad acrosomal). *Diferencias significativas $p<0.05$*

FACTORES	ANOVA		
	Motilidad	Viabilidad	Integridad Acrosomal
Nanopartícula			*
Tiempo de incubación	*	*	*
Concentración	*	*	
Medio de incubación		*	*
Nanopartícula/Medio Inc	*		
Nanopartícula/tiempo Inc	*	*	
Nanopartícula/Concent			
Concen/Tiempo Inc	*	*	
Medio inc/Tiempo	*	*	*
Concent/Medio Inc	*	*	
Conc/Medio/Tiempo	*	*	
Nano/Conc/Medio		*	
Nano/Conc/Tiempo			
Nano/Medio/Tiempo			
Nano/Conc/Medio/Tiempo			

En la **figura 2**, se puede observar, como la motilidad de los espermatozoides (movimiento rectiléneo) disminuye durante la incubación de las células, ello asociado a la interacción de los tres factores de evaluación: concentración, medio de incubación y tiempo de incubación. Se observan las diferencias significativas (*p<0.05)* entre cada una de las concentraciones, para cada medio de incubación con respecto al tiempo, donde podemos ver una disminución a partir de la hora de incubación, disminuyendo por debajo del 40% la motilidad de las células, en especial a partir de la concentración de $50 \mu l / ml$ y se intensifica tal decremento en un medio con PBS.

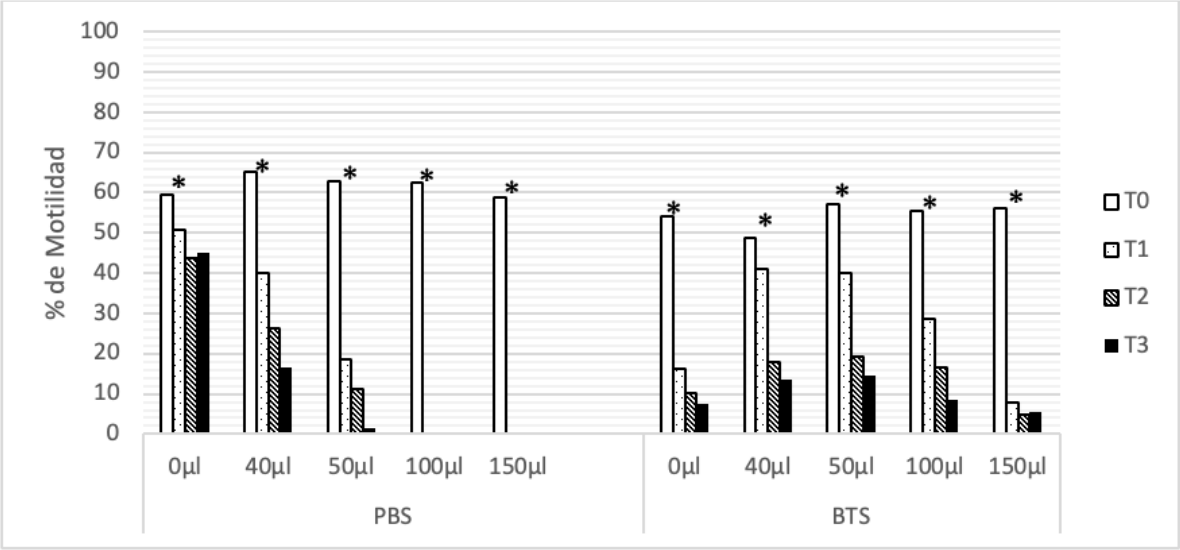


Figura 2: *Porcentaje de motilidad espermática para cada una de las concentraciones de la NPs en los dos medios de incubación durante 0, 1, 2 y 3 horas de incubación (T0, T1, T2 y T3). *Diferencias significativas p<0.05.*

El decremento de la motilidad depende de la dosis utilizada, como lo observaron Schimpf y Cols. (2019) al determinar que a una dosis de 0.5% (p/V) con oligos de quitosán incubados en PBS generan una disminución de la velocidad de los espermatozoides de humano, esto aunado al medio de incubación, ya que al utilizar un medio con características similares al líquido seminal como el TRIS (que incluye citratos, glucosa y piruvato) no existen diferencias en la motilidad[10], por lo que el efecto podría estar relacionado en parte a la molaridad de los medios, dado que también Schäfer-Somi y Aurich (2007) reportaron una disminución de la motilidad en espermatozoides de caninos incubados en PBS. La osmolaridad presente en un medio con PBS es de 282±11.3 mientras que el de TRIS se asemeja más al liquido seminal con una Osm de 308±2.9[14]. Ello podría explicar el porqué en el presente trabajo tanto la motilidad como la viabilidad presentaron mejores porcentajes en un medio con BTS, ya que se sabe que el medio tienen una Osm de 330[15].

En la **figura 3** se muestra como la viabilidad está por encima del 50% aún y con una concentración de $100\mu l/ml$ al utilizar un medio de incubación con BTS. Obsérvese que la viabilidad se mantiene igual al control (no hay diferencias significativas) a concentraciones iguales o por debajo de $50\mu l/ml$, lo cual concuerda con trabajos en donde mencionan que el quitosán no genera daños en la membrana plasmática e inclusive que disminuyen la producción de radicales libres de oxígeno(ROS)[10].

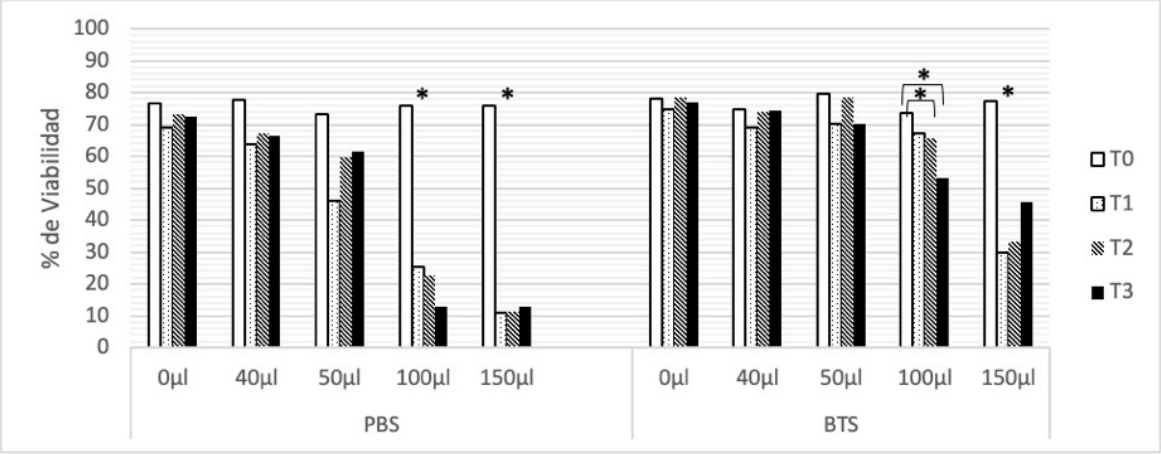


Figura 3: *Porcentaje de viabilidad espermática para cada una de las concentraciones en los dos medios de incubación durante 0, 1, 2 y 3 horas de incubación (T0, T1, T2 y T3). *Diferencias significativas $p<0.05$.*

En la **figura 4** se puede observar un aumento de la mortalidad a las dosis de 100 y $150 \mu l/ml$ de nanopartículas y que ello se asocia también al tipo de nanopartícula empleada, existiendo una mortalidad del 50% de las células a una dosis de $50 \mu l/ml$ para las NPPs-Q-Ce-FIL, lo cual podría estar asociado al tamaño ya que éstas nanopartículas fueron las que obtievieron un tamaño menor en el análisis por DLS (10.7nm) en comparación con las NPPs sin filtrar y filtradas. El tamaño "pequeño" de las NPPs-Q-Ce-Fil podría favorecer la internalización de éstas al utilizar uno de los mecanismo de transporte a través de la membrana, como la osmosis, por canales iónicos o endocitos mediada por proteínas, por ejemplo mediada por caveolina, la cual está presente en microdomios de la membrana de los espermatozoides de cerdo[1,15, 16].

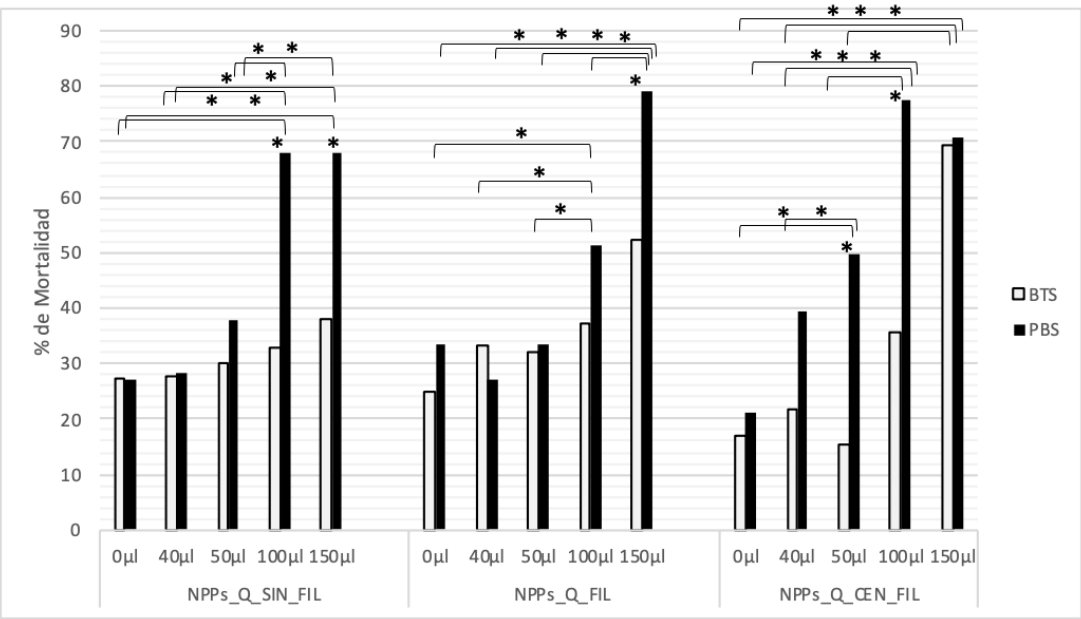


Figura 4: *Porcentaje de mortalidad espermática para cada tipo de NPPs-Q en cada una de las concentraciones en los dos medios de incubación durante tres horas de incubación. *Diferencias significativas p<0.05.*

Finalmente la integridad acrosomal **se mantuvo** durante la incubación *in vitro,* ya que durante las tres horas de incubación e independientemente del tipo de NPPs estuvo por encima del 80%. Sin embargo una de las NPPs utilizadas mantuvo mejor la integridad acrosomal, el cual se relacionó con las NPPs-Q-Ce-FIL y con el medio en PBS (ver **figura 5 y 6**), éste mantenimiento del acrosoma esto podría estar relacionado al tamaño y al medio con una Osm baja, ya que en conjunto mejoraría la internalización de las nanopartículas, sin embargo causa una elevada mortalidad. En éste caso se podría recomendar ampliar la experimentación a dosis menores de $40 \mu l / ml$ y comprobar si existe la internalización de las NPPs como lo menciona Castro y Cols. (2017) al utilizar nanopartículas con núcleo lipídico recubiertas con quitosán, cuya carga positiva del quitosán favorece la internalización en espermatozoides de bovino[3].

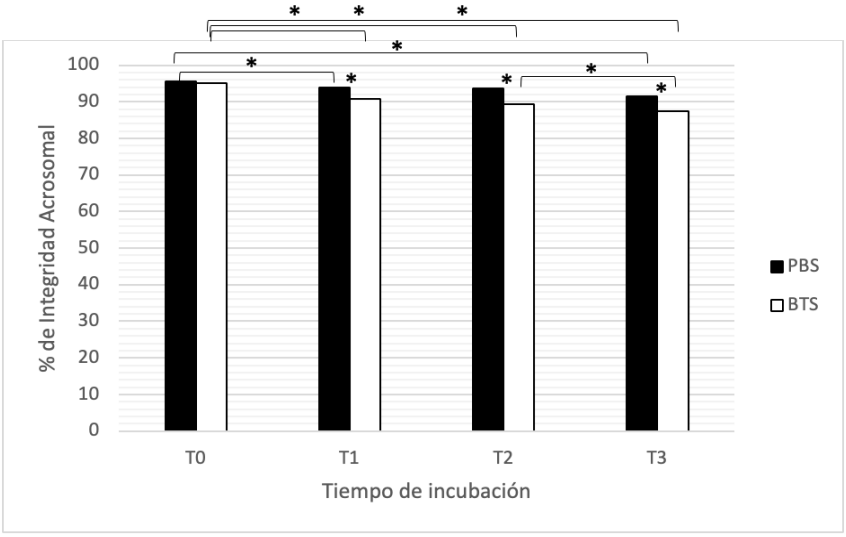


Figura 5: *Porcentaje de integridad acrosomal para cada uno de los medios de incubación durante 0, 1, 2 y 3 horas de incubación (T0, T1, T2 y T3) en este caso sin considerar el tipo de nanopartícula. *Diferencias significativas p<0.05.*

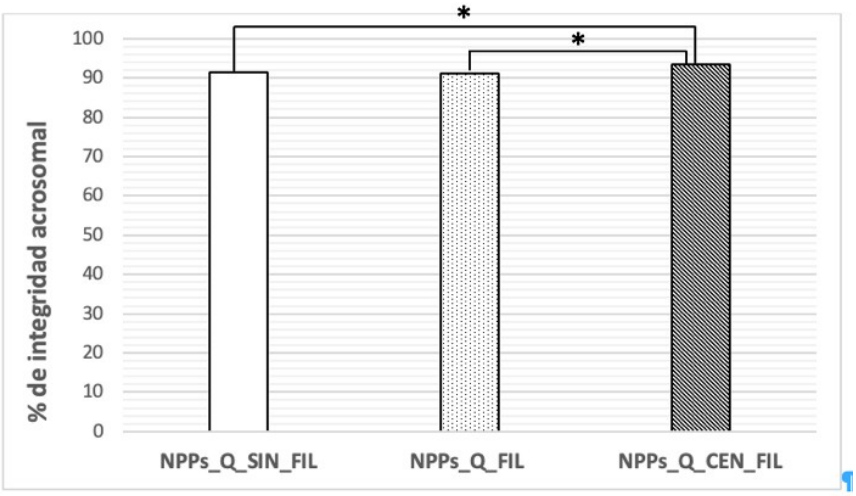


Figura 6: *Promedio del porcentaje de integridad acrosomal para dependiendo el tipo de NPPs-Q. *Diferencias significativas p<0.05.*

5.- Conclusiones

Las nanopartículas poliméricas de quitosán sin filtrar (NPPs-Q-SIN-FIL) en un medio de incubación con BTS (Beltsville Thawing Solution) a concentraciones no mayores de $50\mu l/ml$e incubadas por un tiempo no mayor a una hora podrían ser utilizadas para mantener estable la viabilidad y la integridad acrosomal de los espermatozoides de cerdo. Estos datos podrían ser utilizados como parte del protocolo para la crioconservación de semen por lo que es importante continuar con los trabajos de toxicidad en donde se relacione con la caracterización de las nanopartículas, ya que el tamaño y forma son parte importante de la interación que puedan tener con las células.

AGRADECIMIENTOS:

Proyecto financiado por DGAPA-UNAM:PAPIIT IN219717 y CONACYT: 968596.

6.-Bibliografía

1.- Das J, Choi Y-J, Song H., and Kim J-H. Potencial toxicity of engineered nanoparticles in mammalian germ cells and developing embryos: treatment strategies and anticipated applications of nanoparticles in gene delivery. Human Reproduction Update. 22:5 (2016).

2.- Barkalina N., Jones C., Kashir J., Coote S., Huang X., Morrison R., Townley H. & Coward K. Effects of mesoporous silica nanoparticles upon the function of mammalian sperm in vitro. Nanomedicine: Nanotechnology, Biology, and Medicine.10:859-870 (2014).

3.- Castro J.S.A., Härter R.M., Gomes L.C., Borges D.W. Silveira T. Dame P.J. Jornada D.S. Dahl C.C., Varela J.A.S., Prado W.A. Farias C.V. Kömmling S. Guterres S., Pohlmann A. & Collares T. Effects of chitosan-Coated lipid-core nanocapsules on bovine sperm cells. Toxicol in vitro. 40:214-222 (2017).

4.- Juárez M. M.L., Díaz T. R., Córdova I. A., Lara J. E. R., Gutiérrez P. O., & Cornejo C. M. Á. Evaluación del uso de nanopartículas para mantener la viabilidad de los espermatozoides de verraco sometidos al proceso de criopreservación. Compendio de ciencias aplicadas.169-179 (2018).

5.- Durfey C.L., Swistek S.E., Liao S.F., Crenshaw M., Clemente H.J., Thirumalai R.V.K.G., Steadman C.S., Ryan P.L. Willard S.T. & Feugang J.M. Nanotechnology-based approach for safer enrichment of semen with best spermatozoa. Journal of Animal Science and Biotechnology. 10:14 (2019).

6.- Liu Q., Xu C., Ji G., Liu H., Mo Y., Tolllerud D.J., Gu A. & Zhang Q. Subletal effects of zinc oxide nanoparticles on male reproductive cells. Toxicol in vitro. 35: 131-138 (2016).

7.- Kean T. & Thanou M. Biodegradation, biodistribution and toxicity of chitosan. Advanced Drug Delivery Reviews. 62: 3-11 (2010).

8.- Expósito H. R. Quitosanto, un biopolímero con aplicaciones en sistemas de liberación controlada de fármacos (Tesis doctoral). Universidad Complutense de Madrid, Facultad de Ciencias Biológicas (2010).

9.- Jardón S. García C. G. Quintanar D., Nieto J.L. Juárez M.M.L. & Mendoza S. E. Effect of two glycyrrhizinic acid nanoparticle carriers on MARC-145 cells actin filaments. Applied Nanoscience. 8: 1111-1121 (2018).

10.- Schimpf U., Nachmann G., Trombotto S., Houska P., Yan H., Bjorndahl L. & Crouzier T. Assessment of oligo chitosan biocompatibility towards human spermatozoa. ACS Applied materials & interfaces.11,50 46572-46584 (2019).

11.- Gutiérrez P. O. Valoración in vitro de la capacidad fecundante del espermatozoide de cerdo, criopreservado en diluyentes formulados con trehalosa y una baja concentración de glicerol (Tesis de doctorado). Ciudad de México (México): Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Medicina Veterinaria y Zootecnia (2009).

12.- Gadea J. Review: Semen extenders used in the artificial insemination of swine. Spanish Journal of Agricultural Research. 1(2): 17-27 (2003).

13.-Sawtarie N., Cai Y. &Lapitsky. Preparation of chitosan/tripolyphosphate nanoparticles with highly tunable size and low polydispersity. Colloids and Surfaces B: Biointerfaces. 157: 110-1171 (2017).

14.- Schäfer S.S. & y Aurich C. Use of new computer-assisted sperm analyzer for the assessment of motility and viability of dog spermatozoa and evaluation of four different semen extenders for prediction. Animal Reproduction Science. 102:1-13, 2007.

15.- Lee J., Twomey M., Machado C., Gomez G., Doshi M., Gesquiere A.J. & Moon J.H. Caveolae-mediated endocytosis of conjugated polymer nanoparticles. Macromolecular Bioscience. 1-8 (2013).

16.- Gestel R.A., Brewis I.A., Ashton P.R., Helms J.B., Brouwers J.F., & Gadella B.M. Capacitation-dependent concentration of lipid rafts in the apical ridge head area of porcine sperm cells. Molecular Human Reproduction. 11(8): 583-590 (2005).

Anticuerpos contra leptospirosis en vacas lecheras y parámetros reproductivos

Córdova IA[1*], Iglesias RAE[1], Guerra LJE[2], Juárez MML[3], Huerta CR[4], Gómez VA[5] y Sánchez SR[6]

[1]Departamento de Producción Agrícola y Animal. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, Ciudad de México. * acordova@correo.xoc.uam.mx. [2]Facultad de Agronomía. Universidad Autónoma de Sinaloa, México. [3]Departamentod e morfología. FVMZ-UNAM. [4]Facultad de Veterinaria. Benemérita Universidad autónoma de Puebla, México. [5]Divisón Académica de Ciencias Agropecuarias. Universidad Juárez Autónoma de Tabasco, México. [6]Departamento de Reproducción. INIA, Madrid, España.

1. Resumen

Los problemas reproductivos en ganado bovino, principalmente en el especializado en la producción leche, es muy común, tales como el aborto, el cual puede ser ocasionado por varios factores, principalmente por la existencia de bacterias como *Leptospira spp.* El objetivo de este trabajo fue terminar la presencia de anticuerpos contra Leptospirosis en vacas lecheras y su efecto en intervalo entre partos (IP), servicios por concepción (S/C) y días abiertos (DA). Se realizó toma de muestras sanguíneas de 30 vacas procedentes de una unidad de producción ubicada en el Estado de Hidalgo, México con presencia de aborto, fetos momificados y reabsorción de embriones. Los resultados fueron analizados por estadística no paramétrica. Se obtuvieron resultados positivos en el 73% de los casos analizados, con presencia de tres serotipos *Hardjio, Tarassovi y Hardjio H89*. Los parámetros encontrados fueron

318.89 días de IP, 2.20 S/C y 92.62 de DA. En conclusión, la presencia de Leptospirosis afectó severamente los parámetros analizados.

2. Introducción

La leptospirosis es una enfermedad zoonótica, producida por la espiroqueta del género Leptospira especie *interrogans hardjo Bovis*, principalmente. Está distribuida mundialmente, y en México se encuentran en todo el territorio nacional. Es causante de la disminución en la productividad en la ganadería, generando infertilidad, aumento entre el intervalo de partos y parto-concepción, alto número de servicios por año, abortos y disminución en la producción láctea en vacas lecheras (Yunes *et al*., 2016).

El padecimiento puede pasar desapercibida o confundida con otras enfermedades, su diagnóstico debe de ser por medio de pruebas de laboratorio, para lo cual se han establecido varias técnicas y pruebas de diagnóstico, entre las cuales se encuentra la serológica donde se utilizan de 1 a 13 serovariedades en el caso de Leptospira. La realización de un calendario de vacunación para la prevención es importante para evitar pérdidas reproductivas y por tanto pérdidas económicas para el productor.

El objetivo de este trabajo fue determinar la presencia de anticuerpos contra Leptospirosis en vacas lecheras, así como su efecto en los parámetros reproductivos, IP, S/C y DA.

3. Condiciones experimentales

Se tomaron muestras sanguínea de la vena coccígea por medio de la técnica de Ojeda *et al.,* (2016), a 30 vacas de la raza Holstein de una unidad de producción ubicada en el Estado de Hidalgo, México con antecedentes de abortos, momificaciones y reabsorción de embriones.

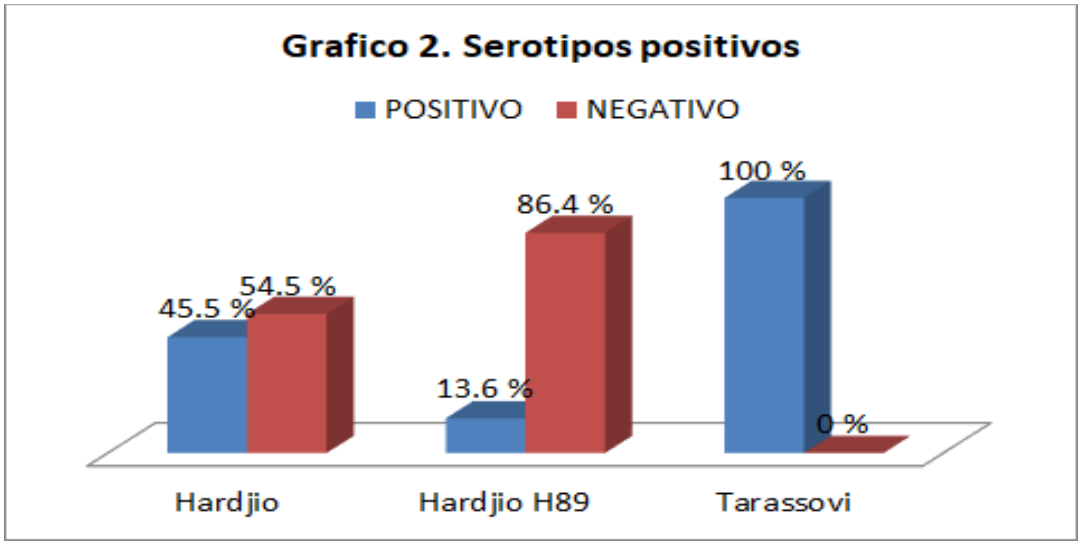
Las muestras fueron analizadas en el laboratorio de Leptospira de la Universidad Autónoma Metropolitana-Xochimilco, utilizando para ello la técnica de aglutinación microscópica, la cual consiste en mezclar el suero a estudiar con leptospiras de

diferentes serotipos, para luego evaluar el grado de aglutinación en el microscopio (Méndez *et al.,* 2013). Se consideraron positivos los sueros que a la dilución 1:100 o superior, mostraron 50 % de aglutinación o desaparición de células del campo a la observación con el microscopio de campo oscuro. La bacteria que se empleo fue de 9 serovariedades de *L. interrogans* (*Icterohaemorrhagiae, Pyrogenes, Grippotyphosa, Canicola, Pomona, Hardjio, Wolffi, Tarassovi, Bratislava*) (Moles *et al.,* 2002). Se determinó su relación con los siguientes parámetros reproductivos: IP, S/C y DA. Los resultados fueron analizados por estadística no paramétrica.

4. Resultados y discusión

En el análisis de las 30 muestras serológicas, se encontró 73 % (22/30) de bovinos positivos, a una o más serovariedades de *Leptospira interrogans*.

En los sueros positivos, se encontraron tres serovariedades de *Leptospira interrogans*: *Hardjio, Tarassovi y Hardjio H89* (gráfica 1), el 14% de los animales mostraron positividad a las tres serovariedades, el 32 % a dos serovariedades y el 55% a un serotipo. Sin embargo, los resultados sugieren una infección activa por la serovariedad *Tarassovi* ya que se encontró en todos los casos.



Gráfica 1. Porcentajes de los serotipos a los que fueron positivas las vacas.

En cuanto a los parámetros reproductivos, al analizar los datos se obtuvo un intervalo entre partos de 318. 89 días, indicando que está por debajo de los parámetros óptimos; días abiertos de 92. 62 días, demostrando estar dentro de los rangos ideales; y finalmente los servicios por concepción obtenido fue de 2.20 mostrando que está por encima del óptimo que es de 1.7 (Tabla 1).

Tabla 1. Resultados obtenidos de parámetros reproductivos de los tres establos de estudio de la cuenca lechera de Tizayuca

Parámetros reproductivos en vacas Holstein de la Cuenca lechera de Tizayuca, Hidalgo.		
Parámetro	**Promedio**	**Óptimos**
Intervalo entre partos (días).	318.89	385
Servicios por concepción.	2.20	1.7
Días abiertos.	92.62	85-110

En este estudio se determinó una frecuencia de 73% de vacas positivas a *Leptospira*, cifra cercana a la obtenida por Ojeda *et al*., 2016, en el que se analizaron muestras sanguíneas de 57 bovinos, encontrando 60% de sueros positivos a *Leptospira interrogans*. La existencia de esta bacteria en los sueros analizados en este trabajo, se atribuye a la presencia de fauna nociva o animales ajenos a la producción de bovinos de leche, como roedores y caninos, siendo estos primeros los principales vectores que diseminan la enfermedad (Benavides y Marcillo, 2016).

Las titulaciones de 1:400 son más significativas para la región, obteniendo en el estudio el 26.6 % de esta titulación, lo que puede deberse a una infección más reciente, pues en la prueba de MAT se logra un máximo de aglutinación a las 2-3 semanas de la infección. El 50% obtuvo titulaciones de 1:800 o superiores, y como se observó en los registros los animales llevaban más de un año sin ser vacunados, lo que puede indicar una posible infección viral activa (Escamilla *et al*., 2007).

Por otro lado, en un estudio realizado por Moles *et al*., (2002), al analizar 4,043 muestras serológicas de vacas de distintas regiones de México, demostraron que *Hardjo, Tarassovi* y H89 fueron las serovariedades más frecuentes en bovinos en México. Lo que concuerda con lo obtenido en este trabajo; además, los resultados demostraron una infección activa por el serovariedad *Tarassovi*, encontrándose en todas las muestras positivas; este serotipo tiene como principal reservorio a los porcinos, y los bovinos pueden actuar como intermediarios; por lo tanto, cabe mencionar que en áreas cercanas al lugar de trabajo de este estudio, se encuentran unidades de producción de cerdos.

Los sueros que fueron analizados en este estudio, procedían de vacas con antecedentes de abortos, presentado fetos momificados o reabsorción de embriones, en similitud con un trabajo realizado por Escamilla *et al*., (2007), donde también se encontraron abortos, fetos momificados y reabsorción de embriones, indicando los autores que estos eventos pueden haber sido causados por más de un agente infeccioso; sin embargo, *L. interrogan*s pudo haber sido el agente involucrado con mayor frecuencia.

5. Conclusiones

En conclusión, la presencia de anticuerpos contra leptospirosis indica que el padecimiento está presente en la unidad de producción de este estudio, lo cual explica los problemas en los parámetros reproductivos estudiados IP, S/C y DA.

6. Bibliografía

Benavides K. L., y Marcillo A. R. Seroprevalencia de Leptospiraa spp en Hembras bovinos de las Fincas lecheras en el Municipio de Pasto, Colombia. Revista Investigación Pecuaria 4(2): 27-32 (2016).

Escamilla H. P., Martínez J. J., Medina C. M., Morales S. E. Frecuency and causes of infectious abortion in a dairy herd in Queretaro, México. The Canadian Journal of Veterinary Research 71: 314–317(2007).

Gädicke P., Junod T., López M., Ortega R., Monti G. Enfermedades abortigenicas en las lecherías de la provincia de Ñuble: prevalencia y análisis. Archivos Medicina Veterinaria 48 (1): 43-65 (2016).

Méndez C., Benavides L., Esquivel A., Aldama A., Torres J., Gavaldón D., Meléndez P., Moles L. Pesquisa serológica de Leptospira en roedores silvestres, bovinos, equinos y caninos en el noroeste de México. Revista de Salud Animal 35 (1): 25-32. (2013).
Moles C. L., Cisneros P. M., Gavaldón R. D., Rojas S. N., Torres B. I. Estudio serológico de leptospirosis bovina en México. Rev. Cubana Med Trop 54 (1): 24-7 (2002).

Ojeda C. J., Espinosa A. E., Hernández G. P., Rojas M. C., Álvarez M. G. Seroprevalencia de enfermedades que afectan la reproducción de bovinos para leche con énfasis en neosporosis.Revista Ecosistemas y Recursos Agropecuarios 3(8): 243-249 (2016).

Yunes A., Feula P. H., Echevarría. Descripción de leptospirosis en rodeos de cría y discusión de un caso sospechoso de leptospira. UNCPBA. (2016).

Combinación de α-tocoferol y quercetina como antioxidantes para la congelación de semen de verraco y calidad espermática

Iglesias RAE[1], Juárez MML[2], Ortiz MAR[3], Guevara GJ[1], Rubén HR[4], Raúl SR[5] y Córdova IA[1*]

[1]Departamento de Producción Agrícola y Animal. Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Xochimilco, México. [2]Departamento de Morfología. FMVZ-UNAM. [3]Universidad Autónoma Metropolitana Unidad Iztapalapa, México. [4]Facultad de Veterinaria. Benemérita Universidad Autónoma de Puebla, México. [5]Departamento de Reproducción. INIA. Madrid, España. * acordova@correo.xoc.uam.mx.

1.Resumen

El objetivo de este trabajo fue valorar el efecto antioxidante de la combinación de α-tocoferol con quercetina, adicionados al diluyente para la congelación de semen de verraco sobre la calidad espermática. Se congeló el semen de verracos de la raza Pietrain y York/Pietrain, en pajillas de 0.5 ml con una concentración de 300 millones de espermatozoides, antes de la congelación se adicionó al diluyente α-tocoferol en concentración de 4 mg/ml (T1), quercetina en concentraciones de 25, 50 y 100 µM (T2, T3 y T4), α-tocoferol + Quercetina en concentraciones de 4 mg/ml+25 µM, 4 mg/ml+50 µM y 4 mg/ml+100 µM (T5, T6 y T7) y el grupo control (T8) sin antioxidante. El semen se congeló con la técnica de Westendorf *et al*. (1975) y modificaciones de Córdova *et al*., (2006). Las pajillas se mantuvieron congeladas en nitrógeno líquido durante 7 días y la descongelación se realizó a una temperatura de 42°C durante 12 segundos. Se analizaron motilidad, viabilidad y NAR. Se realizaron 5 repeticiones de cada cerdo y los resultados fueron analizados con paquete estadístico JMP mediante un diseño completamente al azar en arreglo factorial comparando las medias con una prueba de Tukey. El mejor porcentaje de motilidad fue para T5, T4, T1 y T2 con 39.44, 38.06, 37.33 y 36.53, respectivamente), con diferencia significativa con T8; el mejor porcentaje de viabilidad fueron T5 con 51.41, con diferencia significativa con T3 y T8; y los mejores porcentajes de NAR fueron para T8 con 94.90%, con diferencia significativa con T1. En conclusión, la adición de α-tocoferol y quercetina separados o en combinación, protegen la motilidad, viabilidad y NAR de los espermatozoides del semen de cerdo descongelado.

2.Introducción

El espermatozoide de porcino es muy sensible a las bajas temperaturas (<15°C), ya que las membranas de los espermatozoides son ricas en ácidos grasos poliinsaturados (AGP) y a diferencia de otras especies, disminuyendo el potencial de membrana mitocondria y aumentando la permeabilidad de la membrana plasmática,

volviendo a la célula espermática sensible a las especies reactivas de oxígeno (ROS) producidas durante el proceso de obtención de energía celular, que reaccionan con los AGP, ocasionando daño oxidativo mediado por el proceso de lipoperoxidación (LP), ocasionando que durante el proceso de congelación causen daños bioquímicos y funcionales en el espermatozoide, reduciendo la movilidad, viabilidad y transporte en el tracto genital de la hembra, alterando su potencial fertilizante (Rodríguez y Nivia, 2017).

Con el fin de proporcionar una mayor sobrevivencia post-descongelación, en diversos estudios han sido empleados distintos antioxidantes de índole enzimática y no enzimática (Vitamina C y E, melatonina, butil hidroxitolueno (BHT), catalasa, EDTA, lisina, cisteína, propóleo, MDPA, mezcla glutatión reducido y oxidato y L-carnitina) adicionados al diluyente como aditivos, con el fin de reducir el efecto deletéreo de las ROS durante la conservación espermática, previniendo la perdida de motilidad, viabilidad e integridad del ADN espermático durante la congelación y aumentando la fertilidad (Rodríguez y Nivia, 2017). Dentro de estos antioxidantes se encuentra la quercetina, que ha sido utilizada como aditivo en el diluyente para la conservación de semen de humanos, roedores, bovinos, ovinos, porcinos, caprinos, caninos y equinos (Avdatek *et al*., 2017), observando que reduce la LPO de los espermatozoides durante la congelación, evita su capacitación prematura antes de la inseminación artificial, mejora la motilidad y reduce la fragmentación de ADN de los espermatozoides (Avdatek *et al*., 2017).

El objetivo de este trabajo fue valorar el efecto antioxidante de la combinación de α-tocoferol con quercetina, adicionados al diluyente para la congelación de semen de verraco sobre la calidad espermática.

3.Condiciones experimentales

III.1. Colecta de semen

Se colectaron 10 eyaculados de dos verracos de las razas pietrain puro alemán y york/pietrain de una unidad de producción porcina del Estado de México. Los eyaculados fueron obtenidos con la técnica de mano enguantada descrita por King y Mcpherson (1973) modificada por Reyes y Chung (1994) y Córdova *et al*., (2015). Los sementales tenían entre 1.5 y 3.5 años de edad. El semen colectado se diluyó en proporción 1:1 (v:v) en el diluyente comercial BTS® (KUBUS, S.A.) para su transporte al laboratorio. Se evaluó la motilidad progresiva, viabilidad e integridad acrosomal (NAR) y solo se congelo el semen que tenía una motilidad superior al 80%.

III.2. Congelación de semen

La congelación de semen se realizó siguiendo el protocolo de Westendorf *et al*. (1975), con algunas modificaciones de Córdova *et al*., (2006) y Gutiérrez *et al*., (2009). Después de 7 días de congelación se descongelaron los tratamientos a 42°C durante 12 segundos (Córdova *et al*., 2005) e inmediatamente se hicieron las pruebas de motilidad progresiva, viabilidad y NAR.

III.3. Adición de antioxidantes

Los antioxidantes utilizados fueron α-tocoferol (4 mg/ml), quercetina (25, 50 y 100 µM), y α-tocoferol en combinación con quercetina (4 mg/ml + 25 µM, 4 mg/ml + 50 µM y 4 mg/ml + 100 µM) (Sigma-Aldrich®), los cuales se adicionaron al diluyente A y se mezclaron en un bortex durante 2 segundos, para posteriormente adicionar el diluyente A al paquete espermático y se mezcló con pipeteo.

III.4. Análisis estadístico

Los resultados obtenidos fueron analizados con el paquete estadístico JMP, mediante un diseño completamente al azar en arreglo factorial, con una comparación de medias mediante la prueba de Tukey. Fueron consideradas diferencias significativas para una probabilidad de ($P<0.05$).

4.Resultados y discusión

En el cuadro 1 se muestran los resultados de motilidad de las pajillas descongeladas, se obtuvieron diferencias significativas ($P<0.05$) entre los tratamientos T1, T2, T4, T5, T6 y T8. Para el caso de viabilidad se obtuvieron diferencias significativas ($P<0.05$) entre los tratamientos T5 y T3, T8. Y los resultados obtenidos de NAR, tuvieron diferencias significativas ($P<0.05$) entre los tratamientos T8 y T1.

Cuadro 1. Resultados del análisis estadístico de la motilidad, viabilidad y NAR de los espermatozoides descongelados.

Tratamientos	Composición	Motilidad (%)	Viabilidad (%)	NAR (%)
T1	α-tocoferol (4mg/ml)	37.33^{a}	48.86^{abc}	92.93^{b}
T2	Quercetina (25µM)	36.53^{a}	49.40^{abc}	93.03^{ab}
T3	Quercetina (50µM)	33.28^{ab}	46.28^{c}	94.21^{ab}
T4	Quercetina (100µM)	38.06^{a}	48.13^{abc}	93.70^{ab}
T5	α-tocoferol + Quercetina (4mg/ml+25µM)	39.44^{a}	51.41^{a}	94.13^{ab}

T6	α-tocoferol + Quercetina (4mg/ml+50μM)	36.03[a]	50.70[ab]	93.93[ab]
T7	α-tocoferol + Quercetina (4mg/ml+100μM)	34.50[ab]	47.10[bc]	93.93[ab]
T8	Control	28.53[b]	45.60[c]	94.90[a]
[a-c] Indican diferencia significativa con una *P*<0.05.				

En el cuadro 1. Se puede observar que los mejores resultados de motilidad obtenidos fueron de los tratamientos que contenían antioxidantes (T5, T4, T1, T2 y T6) 39.44, 38.06, 37.33, 37.33 y 36.03% respectivamente, con una diferencia significativa (P<0.05) con el tratamiento control (T8); de estos tratamientos, el que obtuvo mejores resultados fue la combinación de α-tocoferol + Quercetina (4mg/ml+25μM) (T5). Dichos resultados coincidieron con los obtenidos en viabilidad, ya que el mejor tratamiento fue T5 (51.41%), con una diferencia significativa (P<0.05) con los T3, T7 y T8 (46.28, 47.10 y 45.60% respectivamente).

A pesar de que no se tengan registros del efecto de la quercetina o combinación de quercetina con α-tocoferol sobre la motilidad y viabilidad de espermatozoides de cerdo congelados-descongelados, se ha podido observar que la quercetina evita la lipoperoxidación, neutralizando e inhibiendo el desarrollo de los radicales libres, e interactúa con α-tocoferol para resaltar la capacidad antioxidante de esta última y mientras la quercetina es oxidada, se puede reciclar interactuando con el acerbato y el glutatión; por otra parte durante la congelación seminal donde existe un proceso de peroxidación que induce a pérdidas de motilidad, viabilidad y cambios en el metabolismo espermático, el α-tocoferol protege la membrana plasmática del espermatozoide contra la lipoperoxidación, causada por la exposición al oxígeno molecular, actuando como antioxidante por tener la capacidad de transferir un nitrógeno fenólico a un radical peróxido libre de un ácido graso polinsaturado peroxidado reduciendo el daño oxidativo de las membranas del espermatozoide inducido por la congelación, interrumpiendo las destructivas reacciones en cadena de la lipoperoxidación y evitando posibles daños celulares (Williams *et al*., 2015).

En cuanto a los resultados obtenido de NAR, difirieron ligeramente con los conseguidos en motilidad y viabilidad, ya que el grupo control (T8) fue superior al T1 con diferencias significativas (P<0.05), sin embargo, no difirió significativamente con los tratamientos donde se adicionaron quercetina o quercetina combinada con α-tocoferol (T2, T3, T4, T5, T6 y T7) (Cuadro 1). No obstante, todos los resultados obtenidos de NAR se pueden considerar aceptables, ya que son superiores al porcentaje mínimo

(80%) (Córdova *et al.,* 2019) requerido para una inseminación artificial, al igual que fueron superiores a los resultados obtenidos en otros estudios donde se congeló semen de porcino con y sin antioxidantes, obteniendo porcentajes desde el 10% (Williams *et al*., 2015), hasta el 84.75% (Gutiérrez *et al*., 2009).

En conclusión, la adición de quercetina y α-tocoferol separadas o combinadas, protegen la motilidad, viabilidad y NAR de los espermatozoides de cerdo descongelados.

5.Bibliografía

Avdatek F., Yeni D., Inanc M.E., Cil B., Tuncer B. P., Türkmen R. y Tasdemir E. Supplementatios of quercetin for advanced DNA integrity in bull semen criopreservation. Andrologia 50: 1-7) 2017).

Córdova Izquierdo Alejandro, Córdova M. Silvia, Córdova Jiménez C. Alejandro, Pérez Gutiérrez José y Martín Rillo Santiago. Congelación de semen de verraco en dos tipos de pajillas y capacidad fecundante in vitro de los espermatozoides. Ciencia Ergo Sum 12 (3): 271-274 (2005).

Córdova Izquierdo A., Oliva J.H., Lleó B., García Artiga C., Corcuera B.D. y Pérez Gutiérrez J.F. Effect of different thawing temperaturas on the viability, in vitro fertilizing capacity and chromatin condensation of frozen boar semen packaged in 5 ml straws. Animal Reproduction Science 92: 145-154 (2006).

Córdova Izquierdo A., Pérez Gutiérrez J. F., Méndez Hernández W., Villa Mancera A. E. y Huerta Crispín R. Obtención, evaluación y manipulación del semen de verraco en una unidad de producción mexicana. Rev. Vet. 26(1): 69-74 (2015).

Córdova Izquierdo Alejandro, Torres Trejo Diego Isaías, Iglesias Reyes Adrian Emmanuel, Guerra Liera Juan Eulogio, Huerta Crispín Rubén, Villa Mancera Abel E., Ruíz Lang Gustavo, Espinosa Cervantes Román, Juárez Mosqueda Ma. De Lourdes y Sánchez Aparicio Pedro. Valoración reproductiva del toro. Ganadero 45 (1): 78-88 (2019).

Gutiérrez Pérez Oscar, Juárez Mosqueda María de Lourdes, Uribe Carvajal Salvador y Trujillo Ortega María Elena. Boar spermatozoa cryopreservation in low glicerol/trehalose enriched freezing media improves celular integrity. Cryobiology 59: 287-292 (2009).

King G. J. y Macpherson J. W. A comparison of two methods for boar semen collection. Journal of Animal Science 36 (3): 563-565 (1973).

Reyes Coto Marco Vinicio y Chung Sun Li. 1994. Manual de inseminación artificial porcina para pequeños productores. Boletín divulgado No. 118. Ministerio de Agricultura y Ganadería 1-11 (1973).

Rodríguez M y Nivia A. Efecto de la adición de antioxidantes sobre la motilidad espermática post-criopreservación y fertilidad del semen de peces. Rev vet 28 (2): 157-164 (2017 (2017).

westendorf P., Richeter L. y Treu H. Zur tiefgefrierung von ebersperma Laborund Besamungsergebnisse mit dem Hulsengerger Pailletten-Verfahren. Dtsch. Terarztl. Wschr 82: 261-300 (1975).

Williams S., Fernández V., Gavazza M., Marmunti M, Zeinsteger P y Prenna G. Congelación se semen porcino: resultados y avances en la técnica. ANALECTA VET 3 (1): 17-25 (2015).

Diseño de un material lúdico pedagógico como estrategia metodológica para facilitar el aprendizaje de la tabla periódica (T. P) memorama en la UAM-A

Soto, T.M.L.[1]; Chávez, M.M.[1]; Fernández, S.L.[1]; Hernández, M.L.[1]; Méndez R.J.[1]; Aguilar, G.L.F.[1]; Villagomez, P.M.A.[1]

[1]Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco (UAM-A) – División de Ciencias Básicas e Ingeniería. Departamento de Ciencias Básicas e Ingeniería- Área de Química.

mlst@azc.uam.mx, mcm@azc.uam.mx, lfs@azc.uam.mx, lhm@azc.uam.mx, yisus_mr@hotmail.com, lfag@azc.uam.mx, mario@24cero5.com

1. Resumen

En este trabajo se presentarán los resultados finales de la elaboración de un material didáctico, el cual tiene como objetivo la enseñanza de la tabla periódica (herramienta fundamental en cualquier ingeniería) de una manera diferente que le permita a los alumnos retener la información necesaria que contiene dicha herramienta.

Con este material didáctico se espera que los alumnos de ingeniería puedan retener la información que contiene la tabla periódica, de forma que se les faciliten los conocimientos necesarios para utilizarla durante su carrera, ya que es un tema esencial en la enseñanza de la química.

Cada ficha tiene información de los elementos químicos (Símbolo, nombre, número atómico, configuración electrónica, estado de oxidación, ubicación, entre otros datos). Los resultados esperados es que los alumnos obtengan los conocimientos de una manera dinámica y objetiva.

2. Introducción

Este trabajo está enfocado en la elaboración de un memorama con información que contiene la tabla periódica de los elementos químicos, material didáctico que se implementará en cursos de química básica experimental para que los alumnos adquieran conocimientos físicos y químicos de los elementos que la conforman.

El buscar nuevas estrategias de aprendizaje así como adaptar diversos materiales didácticos dentro de la enseñanza de temas fundamentales, tiene como objetivo promover ambientes educativos diferentes, así como la integración del grupo y el empleo de valores como trabajo en equipo, respeto, tolerancia, entre otros, los cuales, en la actualidad son importantes para el buen desarrollo laboral.
Un memorama es un juego de mesa conformado por pares de cartas, el cual tiene como objetivo, después de combinarlas al azar, encontrar a través de la memoria la pareja correspondiente de la carta elegida. El juego termina cuando ya no hay cartas boca abajo en la mesa; el ganador del juego es aquel jugador que logré obtener mayor cantidad de pares correctos.

Al aplicar este tipo de juego de azar en materias de química, aplicamos a esta rama del conocimiento una forma de aprendizaje más didáctica logrando una memorización ágil y rápida de conceptos en personas que participan en la actividad.

La tabla periódica es considerada una de las piezas fundamentales en la historia de la química, y es un tema esencial en la enseñanza y el aprendizaje de la ciencia en todos los niveles educativos [1].

Se ha demostrado que al estudiar los elementos químicos que se encuentran en la tabla periódica,

el aprendizaje de memoria es importante para familiarizar a los estudiantes con ésta, de tal manera que puedan aprender y recordar nombres, símbolos, estados de oxidación, número atómico, configuración electrónica, ubicación y un sin fin de información que podemos encontrar en ella.

El contenido de la tabla periódica llega a ser un problema en el aprendizaje ya que es demasiada información que se debe memorizar, esto tiene como resultado el desinterés por parte de los alumnos y no toman la importancia necesaria al tema, es por eso que con la implementación de este material didáctico dentro de las aulas, se espera tener como resultado un mejor aprendizaje de la tabla periódica, además de la participación activa de los alumnos y la mejora del ambiente escolar dentro del aula, ya que se fomenta el trabajo en equipo, el respeto a los demás compañeros, la tolerancia a la frustración, entre otros valores esenciales para el desarrollo humano.

Con el material didáctico que se ha desarrollado, se desarrollará la capacidad de investigación de los alumnos, ya que se presentará la información del elemento y el alumno tendrá que buscar a que elemento es al que se hace referencia.

El uso de este material didáctico permite trabajar en el aula de forma más dinámica y divertida, de esta forma se tendrá un aprendizaje significativo y sólido que se conseguirá al jugar con el material elaborado. Este juego constituye uno de los instrumentos más valiosos para hacer del aprendizaje de la tabla periódica un proceso más participativo y mejorar la actitud de los alumnos. Con este trabajo, se espera romper con la estructura tradicional de la enseñanza de la química y fomentar el aprendizaje de los elementos químicos, información que los alumnos van a utilizar durante su carrera.

3. Condiciones experimentales

En primera instancia, se investigó y se identificaron las principales características específicas (propiedades físicas y químicas) de cada uno de los elementos que se encuentran en la tabla periódica, dicha información fue consultada en libros de texto, tablas periódicas comerciales y algunos artículos, para posteriormente jerarquizar aquellas que son más importantes y elementales las cuáles fueron seleccionadas para incluirlas en las fichas del memorama; posteriormente, mediante el uso de un programa computacional (Microsoft Publisher) fueron diseñadas cada una de las fichas que integran dicho material didáctico.

Investigar las características y propiedades físicas más importantes de los elementos químicos de la tabla periódica. La actividad que se realizó fue diseñar las fichas que integran el memoraba,

utilizando y anexando a cada una lo más relevante de cada elemento químico, a continuación se presenta en forma de lista la información que contienen:

a) Número atómico del elemento químico: Número total de protones que tiene cada átomo de ese elemento. Se suele representar con la letra Z [1].
b) Símbolo del elemento: Abreviación que se utiliza para identificar a cada uno de los elementos químicos, compuesto por una o dos letras del alfabeto. La primera letra del símbolo se escribe con mayúscula y la segunda (si la hay) con minúscula [2].
c) Nombre del elemento químico.
d) Configuración electrónica semi-desarrollada: Indica la manera en la cual los electrones se encuentran distribuidos en los orbitales moleculares, dicha información determina las propiedades de combinación química de los átomos y por lo tanto su posición en la tabla periódica de los elementos [4].

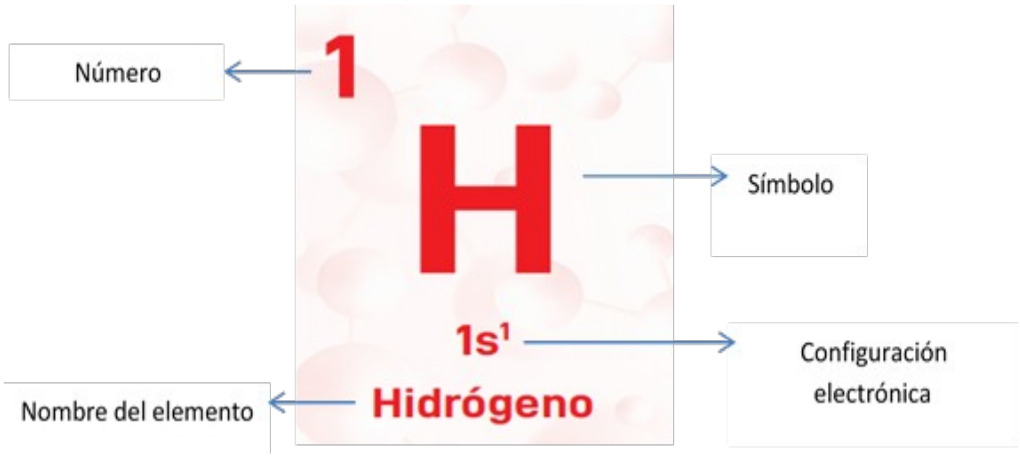


Figura 1. Vista interna ficha A

El contenido de la segunda ficha se enlista a continuación:

a) Masa atómica: masa de un átomo, más frecuentemente expresada en unidades de masa atómica unificada, es la suma del número de neutrones y de protones que posee un átomo, con frecuencia se encuentra denotada en libros con la letra A [1].
b) Grupo o familia a la que pertenece el elemento químico: grupo de elementos que tienen propiedades físicas y químicas similares, variando éstas de forma más o menos importante dentro del grupo.
c) Bloque: La tabla periódica se divide en bloques de elementos según el orbital que estén ocupando los electrones más externos, tomando el bloque el nombre de dicho orbital, es decir s, p, d o f.

d) Nombre del descubridor del elemento.
e) Estado(s) de oxidación: Indicador del grado de oxidación de un átomo que forma parte de un compuesto u otra especie química, éste fenómeno se presenta cuando un elemento o compuesto pierde uno o más electrones y queda con una carga parcial perdiendo la neutralidad [4].



Figura 2.Vista interna ficha B

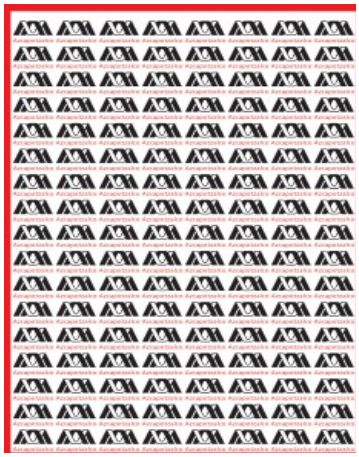


Figura 3. Vista externa de las fichas

4. Resultados y discusión

Los objetivos planteados durante la realización de este material lúdico se cumplieron, ya que se obtuvo un producto tangible que apoyará en la enseñanza de la química en uea´s de laboratorio reforzando el conocimiento básico como lo es el estudio de los elementos que conforman la tabla periódica. El memorama permitirá conocer información relacionada con cada uno de los elementos que se han descubierto hasta la actualidad y reforzará aquellos que ya hayan sido adquiridos en cursos anteriores.

Por otra parte, el uso de dicho material didáctico permite al alumno y al docente organizar las acciones de tal forma que logren sus metas previstas de la manera más sencilla posible, facilitando así el proceso de enseñanza-aprendizaje con el objetivo de que el alumno adquiera los conocimientos y los ponga en práctica.

La meta planteada inicialmente pudo ser alcanzada elaborando un juego didáctico “memorama”, herramienta que a futuro podrá ser utilizada y servirá como apoyo para que los profesores hagan uso de ella en materias que tengan asignadas cada trimestre, sobre todo en aquellas en las que involucre la participación activa de los estudiantes, que con frecuencia se requiere en cursos experimentales, y desde el enfoque del alumno, que aproveche dicho material para reforzar conocimientos adquiridos previamente y complementar con nueva información desconocida, esto hace del proceso enseñanza-aprendizaje algo divertido, atractivo y motivador, fomenta el aprendizaje cooperativo, y ayuda a los alumnos con dificultades a integrarse en el grupo.

Los resultados obtenidos al término este trabajo fueron sumamente favorables, ya que la obtención del memorama traerá como resultado, un mayor interés por parte de los alumnos.

5. Conclusiones

Este material didáctico, facilitará la enseñanza de la tabla periódica, de una manera muy divertida y a la vez muy sencilla, el cual se pondrá en práctica en las clases de química y sus laboratorios.

Esta herramienta de trabajo se implementará como un juego didáctico en las asignaturas de química, para que el alumno tenga un mayor interés de aprender y sobre todo, se le facilite el aprendizaje de la tabla periódica de una manera sencilla y divertida. Además del conocimiento adquirido, el alumno desarrollara actitudes importantes como la participación, el trabajo en equipo, la investigación de las propiedades de los elementos químicos, entre otras.

La recomendación desde el punto de vista pedagógico, acerca de la utilización del material didáctico que, ontológicamente ha sido pensado únicamente para la asignatura de química y su laboratorio a nivel superior, sea utilizado en los tres niveles de educación (educación básica, educación media y educación superior), para que desde el inicio de su formación en esta ciencia, el conocimiento básico de esta materia lo tengan consolidado.

6. Bibliografía

39. Chang, R.; College, W. Química 11° Edicion, Mc. Graw Hill. 2014.
40. Gray, T. Los elementos. Una exploración visual de todos los átomos que se conocen en el universo. Larousse. 2009.
41. Casa del libro. Tabla periódica de los elementos químicos. Hunes de México. SA de CV

Silberberg, M.S Química General. La naturaleza molecular del cambio y la materia. 2° Edición, Mc Graw Hill, 2000.

Trabajo metodológico en el Año académico, forma básica de gestión de la educación en valores

Jaime-Mirabal, J.M.[1] y Ladino-Luna, D.[2]
[1]CES, Universidad de Pinar del Río, Martí No. 300, Pinar del Río, Cuba.
[2]FPI, Dpto. Ciencias Básicas, Universidad Autónoma Metropolitana-A,
Av. San Pablo 180, Atzcapotzalco, Cd. de México, México
gjaimem@upr.edu.cu, dll@azc.uam.mx

1. Resumen

En el presente trabajo se realiza una valoración de los conceptos educación en valores, estilos de aprendizaje, proceso de enseñanza y gestión, particularizando una diversidad terminológica en estas categorías. Para los estilos de aprendizaje se tuvo en cuenta el concepto de “Zona de Desarrollo Próximo” (ZPD), a partir del diagnóstico. Respecto al proceso de enseñanza, se muestra como una adecuada alternativa el método de trabajo en grupo, para fortalecer valores y actitudes. Se asume que el proceso de gestión de la educación en valores, para la formación integral del estudiante, necesita de alternativas de superación continua de los profesores, concluyendo que el año académico constituye la célula esencial de este proceso. Se concibe una estrategia educativa, cuyo documento rector debe tener el diagnóstico integral de estudiantes, profesores y proceso, la gestión del trabajo metodológico, el proyecto educativo con sus dimensiones de influencia y la gestión de las acciones de comunicación.

2. Introducción

La formación de profesionales integrales puede ser lograda en un proceso de formación dirigido por profesores con vasta experiencia académica. Para lograr este fin, una alternativa es la articulación de la educación en valores, los estilos de

aprendizaje y el proceso de enseñanza, de manera que sea posible obtener la competencia profesional deseada, efectivamente. Así, los métodos de enseñanza a emplear en cada clase, analizados por el profesor de la asignatura, deben estar en correspondencia con los estilos de aprendizaje de sus estudiantes, identificados mediante un diagnóstico fino.

Al respecto, Ackerman[1] analiza las diferencias significativas entre Piaget y Papert, en cuanto a que la teoría de los estadios desarrollada por Piaget se basa en intentar establecer elementos comunes en el desarrollo del pensamiento, (definición o caracterización del sujeto epistémico), en tanto, Papert da mayor importancia a las diferencias que a las semejanzas en los modos de pensar de los sujetos. Este punto de vista provee un marco de referencia para estudiar la formación de las ideas y su transformación cuando se expresan en distintos medios y cuando se modifican en contextos particulares. De esa manera, Obaya[2] considera que Papert desvía la atención del estudio de las etapas del desarrollo hacia el estudio del individuo o de los estilos de aprendizaje, relacionados con las diferentes culturas.

Esta problemática requiere especial atención dado los constantes cambios que se producen en la sociedad. Para Varela[3], la precisión del sistema de conocimientos que constituyen el cuerpo teórico de una ciencia, en el marco del sistema general de conocimientos en una determinada etapa histórica de la humanidad, es un aspecto fundamental para una adecuada labor: docente, investigativa o práctica de un determinado especialista. Es así, debido al vertiginoso desarrollo científico-técnico de la época contemporánea, que hace que la información y los datos de las ciencias se incrementen y envejezcan a velocidades asombrosas. Por eso, la determinación del lugar de una ciencia entre las restantes, y el sistema de las interrelaciones a que se encuentra sometida, constituyen un importante fundamento filosófico, teórico y metodológico, que la práctica social ha develado ante los especialistas de las diferentes disciplinas del conocimiento. Es ahí donde el profesor entra para asumir su papel de agente catalizador de la cultura que le ha antecedido, mostrando su grado de actualización en su especialidad y su preparación en cultura general, para ubicarse a la altura de las circunstancias actuales.

En cualquier carrera de la enseñanza superior, se considera un deber lograr estudiantes integrales y competentes. Para ello, se requiere que se apropien de los conocimientos, las habilidades y los valores necesarios para ponerlos en función del bienestar de la sociedad al egresar. El empleo de empresas o laboratorios, simulados y virtuales, constituye un reto en el proceso de enseñanza-aprendizaje, al ofrecer a los estudiantes herramientas metodológicas para resolver problemas relacionados con su carrera, proveer el desarrollo de la creatividad y el pensamiento lógico, en acuerdo con sus vivencias y en armonía con una educación en valores promovida por el profesor, que involucre la investigación y la extensión universitaria.

En el presente trabajo se hace un análisis de los conceptos básicos necesarios para el planteamiento de la gestión de la educación, haciendo énfasis en la manera como se ha desarrollado en Cuba, en algunos centros de educación superior. Se hace un breve análisis de la categoría Educación, para después vincularlo a la Teoría de la Educación en Valores. Posteriormente se discuten los llamados Estilos de Aprendizaje, para finalmente exponer la manera como estas ideas se han aplicado en el modelo cubano de Educación.

3. Condiciones experimentales

Para la obtención de los resultados se asumió como método general el método dialéctico-materialista, que permite el estudio del objeto como un proceso, la determinación de las principales relaciones dialécticas, sus contradicciones y la integración de otros métodos. Se usaron métodos teóricos para la comprensión de los hechos y fenómenos asociados al objeto de estudio. Se utilizó el método histórico-lógico, para la sistematización teórica de las categorías Educación, Educación en Valores y gestión y la revelación de su esencia, necesidades y regularidades en su devenir histórico. El método de modelación, para las abstracciones necesarias y fundamentar el proceso estudiado. El método sistémico-estructural, con la modelación, permitió determinar los elementos del plan de trabajo metodológico, y las funciones cíclicas para un proceso de gestión de la educación en valores, sus niveles, sus relaciones y los componentes de la estrategia educativa. Los métodos empíricos permitieron obtener información sobre las características del objeto, y diferentes datos facilitaron la comprensión sobre él, entre ellos: análisis documental, entrevistas para profundizar en los criterios y experiencias de profesores, estudiantes, jefes de años y directivos. Encuestas: para recoger información de profesores y estudiantes sobre las características del proceso objeto de investigación. Observación: para constatar el comportamiento de las acciones de la estrategia educativa, y las incidencias en la preparación de los profesores para desarrollar dicho proceso.

3.1 La categoría Educación, su implicación en la Educación de Valores

Hablar de la categoría Educación lleva a un análisis desde diferentes puntos de vista y dimensiones. Así, Freudenthal[4], considera una relación entre los problemas de las vivencias personales y el desarrollo de la sociedad, que el mismo individuo resuelve. Por su parte Varona ya consideraba que una educación integral permitiría formar individuos completos[5], esto es, resulta necesario considerar la educación como un proceso con el fin de preparar al hombre para la vida, con una concepción dialéctico-materialista del mundo, sobre la base sólida de los conocimientos científicos y una conducta moralmente aceptable para la sociedad.

Las referencias anteriores conciben la Educación desde las dimensiones: curricular, investigativa y extensionista, para lograr el desarrollo integral de la personalidad. La delimitación de las tareas del profesor tiene estrecha relación con la extensión que se da al concepto: educar implica salir del proceso de enseñanza-aprendizaje, extendiendo su influencia a otros contextos y niveles de participación. Un concepto más estrecho reducirá el trabajo del profesor a lo escolar y a la transmisión de contenidos y normas pre-elaboradas[6]. La influencia educativa no sólo debe ejercerse en lo curricular (la clase), debe extenderse a lo extracurricular (investigación, práctica laboral y extensión universitaria). Ayala[7] considera que una formación total logra hábitos de conducta, con emociones dirigidas, promoviendo empatía, evitando actitudes contrarias a ésta.

A partir de esta diversidad de criterios, se puede considerar que existen puntos coincidentes en los conceptos de Educación, al concebirla como un proceso integrador de todas las influencias educativas dirigidas a la formación de la personalidad integral

del estudiante, en vínculo estrecho de lo instructivo con lo educativo, desde una perspectiva tanto curricular como extracurricular en el proceso de formación en la enseñanza superior. Las categorías educación en valores, estilos de aprendizaje y proceso de enseñanza, han sido analizadas desde el punto de vista de la enseñanza tradicional (centrada en el profesor), hasta las ideas contemporáneas (aprendizaje centrado en el estudiante).

3.2 Educación en valores

Para Brezinka[8] la educación en valores es una corrección de la democracia liberal a favor de ciertas virtudes cívicas imprescindibles y de deberes fundamentales que los individuos tienen con la colectividad. Chacón[9] la considera trabajo pedagógico, basado en un proceso interactivo e intersubjetivo de relaciones interpersonales directas, que no podrán ser sustituidas por la tecnología. Se le identifica como actuación pedagógica, donde las acciones y operaciones pedagógicas se dirigen a la educación integral[10]. Parra[11] considera necesario un análisis histórico de los valores. Báxter[12] la concibe como labor pedagógica para formar, transformar y educar la personalidad del estudiante, que es la idea central de dicha teoría. Nótese cómo la educación en valores, así entendida, busca la formación integral del estudiante, que necesita ser conscientemente gestionada. Una mirada a la bibliografía en torno a este aspecto nos permite reconocer la dispersión terminológica, en tanto se precisa como actuación pedagógica, trabajo pedagógico, labor pedagógica, trabajo educativo y labor educativa, lo que evidencia puntos de coincidencia[13].

3.3 Estilo de aprendizaje

Al abordar la categoría estilo de aprendizaje cabe destacar uno de los problemas tratados por Freudenthal[4]: ¿cómo aprende la gente? Propone resolver el problema del proceso de aprendizaje con la esquematización; identificando el estilo de aprendizaje mediante la observación y reduciendo el diagnóstico de los estudiantes al empleo de un solo instrumento. Pero de esa manera no es posible obtener una caracterización certera. No obstante, enfatiza una cuestión esencial relacionada con los aprendizajes juntos, lo que posibilita fomentar valores como la cooperación, vital para aprender a convivir en la sociedad. Retomando esta idea, es posible considerar que una buena manera de adquisición de conocimientos es mediante el uso de esquemas lógicos, incluyendo soluciones de ejercicios prácticos integradores de contenidos, aplicando el método de enseñanza “trabajo en grupo”. Esto es, consideramos que cualquier disciplina puede ser enseñada dentro de contextos concretos, en procesos de aprendizaje dentro de la vida práctica o al menos simulada en aulas o laboratorios.

Es preciso señalar la teoría histórico-cultural de Vigotsky[14], en su concepto de “Zona de Desarrollo Próximo” (ZPD), definida como la distancia entre el nivel real de desarrollo determinado por la capacidad de resolver independientemente un problema y el nivel de desarrollo potencial determinado a través de la solución de un problema, bajo la guía del adulto, o en colaboración de un compañero más capaz. El énfasis en esta definición está en reconocer las características personales de los estudiantes (su nivel de desarrollo), para ofrecer adecuados niveles de ayuda en su formación, acorde a sus necesidades educativas. La esencia de esta teoría parte del diagnóstico, de manera que los participantes en el proceso (profesores y estudiantes) asuman su papel

durante el proceso de educación en valores. Son importantes la actitud y habilidades del profesor, al organizar la actividad a desarrollar, el ambiente de trabajo y conocido el nivel de desarrollo de los estudiantes al planificar las tareas de aprendizaje individualizadas.

Otro aporte de Vigotsky a considerar son los mediadores verbales[15]. Mediante la comunicación los estudiantes adquieren conocimientos, actitudes, convicciones, normas de conducta y se transmite la cultura que la sociedad ha desarrollado, transferida al estudiante desde diferentes contextos. Al respecto, Obaya[2] considera el concepto de "aprender haciendo", respetando los intereses y motivos propios de cada estudiante.

Los dos últimos puntos de vista, encuentran trascendental la realización de un proceso de gestión, partiendo de determinar los rasgos de la personalidad y las potencialidades de los estudiantes para proyectar una educación en valores, donde se tracen estrategias y acciones de orientación e intervención hacia lo profesional, potenciando su desarrollo y modo de actuación acorde con las normas de conducta, los intereses y motivos para su mejor inserción en la sociedad. El enfoque histórico-cultural sustenta la gestión de la educación en valores en la enseñanza superior cubana, desde el cual se asume que la enseñanza es un proceso, promotora del desarrollo, ambos son reconocidos como fundamento teórico-metodológico de la escuela cubana.

3.4 Proceso de enseñanza

En el proceso de formación se manifiestan múltiples problemas, pues las relaciones entre la enseñanza y el aprendizaje no constituyen un simple "ofrecer" y "tomar"[16]. Existen múltiples tensiones que complican la labor de dirección por parte del profesor, y la actividad de aprendizaje del estudiante. Pero constituyen la premisa básica para el movimiento hacia un plano superior del proceso de enseñanza-aprendizaje. Este proceso se caracteriza por la constante interacción de tres componentes: la materia de enseñanza (contenido de la asignatura), la acción de enseñar (proceso del profesor como mediador de la materia de enseñanza) y la acción de aprender (proceso de apropiación de la materia de enseñanza por el estudiante).

La apropiación de conocimientos por parte de los estudiantes no es tarea fácil. Subsisten múltiples relaciones entre los conocimientos correctos, que constituyen el núcleo de las tareas planteadas por la escuela, y los conocimientos ya asimilados por los estudiantes. En la relación de lo nuevo y lo viejo se refleja el cambio de lo cuantitativo a lo cualitativo. Makarenko[17] hizo notar que el trabajo, como medio educativo, es solo una parte del sistema general, que la optimización del proceso de enseñanza-aprendizaje es la resultante de que éste no puede verse como algo adicional, sino en toda la gestión de la institución educativa. Se puede considerar que el proceso de enseñanza constituye un conjunto dinámico y complejo de actividades del pedagogo y de los educandos[18].

Por otro lado, algunos autores centran su atención en el análisis del proceso de enseñanza o de educación[5,18,19]. Además existen diversas formas de designar la acción de enseñar y educar. Como proceso docente-educativo y/o proceso de enseñanza-aprendizaje[4,16,20,21]. Como proceso pedagógico[22]. Como proceso de enseñanza-

aprendizaje desarrollador[21,23,24]. Pero existe consenso al considerar la gestión de la educación en valores un proceso integrador para formar la personalidad del estudiante.

De lo anterior se puede inferir que los problemas de desarrollo de las potencialidades de los estudiantes, la formación de sus convicciones ideológicas, la independencia de pensamiento, el temple de espíritu y la capacidad de oponerse a las influencias nocivas, aún no están suficientemente resueltas. La causa pudiera ser que las instituciones educativas, no aprovechan plenamente las posibilidades de que disponen, para educar en el espíritu de una moral, una conducta óptima y una actitud consciente hacia el estudio y el trabajo. La enseñanza debe apoyarse siempre en el sentido común de los estudiantes, cultivándolos y librándolos de prejuicios y equívocos.

Otro criterio interesante es el de Papert y Harel[25], que plantean que la computadora se percibe como una innovación educativa, y no debe buscarse solamente el uso de mejores métodos y medios de enseñanza, sino concebir actividades para los estudiantes, que despierten su interés, los motiven y estimulen de manera creativa. Es preciso señalar que estas observaciones enfatizan la interrelación que debe existir entre los componentes no personales (contenido-método-medio), del proceso. En el caso del proceso de enseñanza asistida o a distancia, los programas de estudio con ayuda de ordenadores u otros medios digitales, son un instrumento de apoyo para el profesor, que no sólo individualizan el aprendizaje, también pueden organizar ejercicios para esclarecer aquellos contenidos en los que presentaron dificultades los estudiantes. Sin embargo, su uso posee limitaciones, pues es imposible realizar análisis a las respuestas erróneas de manera conjunta, entre los profesores y los estudiantes; no facilita la interacción entre los estudiantes, por ende, resulta difícil poder educar en valores. Un ejemplo interesante es un sistema desarrollado en la Universidad Autónoma Metropolitana (campus Azcapotzalco, México), mediante la página https:galois.azc.uam.mx, donde se ofrece ayuda a estudiantes con dificultades en el modelo tradicional, para aprender a su ritmo.

Es indiscutible que los ordenadores deben ser un aliado del profesor, para facilitar el aprendizaje, lograr la motivación hacia los contenidos de los programas, estimular la autonomía, la creatividad de los estudiantes y permitir la actualización tanto de profesores como de estudiantes[2], pero se debe pensar además, en la manera de cómo educar en valores mediante el uso de ellos. Ayala[7] hace notar que los conocimientos pueden ser de tipo conceptual (aprendizaje de hechos, teorías y principios), procedimental (referidos al conjunto de acciones ordenadas-destrezas, estrategias y técnicas-orientadas a la consecución de una meta) y actitudinal (formación de valores o de cierta normatividad para la acción). Así, se considera importante la posibilidad de tenerlos presentes en el proceso de gestión de la educación en valores.

Consideramos que las personas que han aprendido a aprender, a adaptarse y cambiar, que admiten que ningún conocimiento es firme, que siempre hay manera de ampliarlo, pueden tener la certeza y la confianza de hacer suyo el conocimiento. Se necesitan profesores abiertos y flexibles, comprometidos en los procesos de cambio, capaces de transmitir conceptos y valores del pasado, aceptando las innovaciones del presente en la preparación para el futuro. Se concibe la necesidad de diálogo, responsabilidad compartida y amplia comunicación, como requisitos indispensables para el empleo del método de trabajo en grupo, entre profesores, entre profesores y

estudiantes, y entre los propios estudiantes, para lograr una formación integral. Estas ideas constituyen un soporte esencial para la gestión de la educación en valores, buscando superar los obstáculos que se enfrentan en la actualidad en el terreno económico y de los valores morales de la sociedad a la que se aspira contribuir.

Esta diversidad de criterios posee puntos coincidentes en cuanto a un proceso integrador de las influencias educativas dirigidas a la formación de la personalidad del estudiante, en estrecha unidad de lo instructivo con lo educativo, tanto curricular como extracurricular en la educación superior. Teniendo en cuenta las valoraciones realizadas en torno a las categorías educación en valores, estilo de aprendizaje y proceso de enseñanza se reconoce que ellas tienen una implicación teórica y metodológica, al abordarlos.

4. Resultados y discusión

4.1 La gestión como proceso de influencia consciente en la educación en valores

El término gestión proviene del latín gestio: “acción de administrar”. Así, gestión deviene en dirección: actividad profesional tendiente a establecer los objetivos y medios de realización, a precisar por la organización de sistemas, al elaborar la estrategia del desarrollo del personal. También se asocia a: dirección, administración, gerencia, conducción, entre otros. El análisis de la gestión en la Educación Superior presupone reconocer qué se entiende por gestión, lo que lleva a un breve análisis de su origen e implicaciones, en sentido general, para particularizar en el contexto educativo.

Peter Drucker es considerado el "padre" de la teoría de la gestión. Desde los años 40, desarrolló su teoría, al integrar un triple concepto sobre este término. Critica las prácticas de gestión anteriores, planteando abandonar la idea de que hay un modelo ideal de gestión y que ésta se aplica sólo a las empresas[26]. Varios autores han abordado el término “dirección o gestión”. Algunos centrándose en definir dirección[5,27,28,29]. Otros en gestión en la educación y formación de profesionales. Como proceso administrativo o de gestión. Otros lo denominan gestión pedagógica y dirección del proceso pedagógico[22,31].

La gestión en instituciones educativas parte de presupuestos teóricos generales que se particularizan en la enseñanza superior, en función de la formación de profesionales. Así, para Freudenthal[4] los problemas educativos se resuelven considerando un proceso largo, el proceso de aprendizaje, logrado tal vez mediante una estrategia de cambio. Al responder a ¿cómo diseñar el desarrollo educativo para una estrategia de cambio? Señala dos extremos, el más conservador (los libros de textos) y el más progresista (la preparación de profesores). En el estudio del significado y uso de la gestión se evidencia una cierta confusión, y una polémica sin alcanzar un consenso general, donde algunos autores resaltan las diferencias entre administrar, gestionar y dirigir. La manera de definirla depende de las escuelas administrativas y de cada uno de sus representantes.

En instituciones educativas se ve como conjunto de operaciones directivas básicas, comunes a cualquier organización incluyendo planificación, organización, ejecución y control con una implicación esencial, que se particulariza en la enseñanza superior. Tiene elementos de tipo administrativo, que en esencia es didáctica. La

educación en valores, desde este punto de vista, debe estar apoyada por el trabajo metodológico como forma de gestión de la didáctica, y la preparación de los profesores. El proceso de gestión de la educación en valores exige de alternativas para su mejor concepción. Presupone un "sistema integral de superación que debe abarcar los componentes que un profesor debe dominar (….) su preparación político-ideológica, científico-técnica, pedagógica, económica, sociológica y en técnicas de dirección"[32].

En el contexto cubano se considera que la superación es condición necesaria para la gestión de este proceso, pero no se garantiza en su integridad la gestión de la educación en valores en la enseñanza superior, para lograr una mayor eficiencia en todo el proceso formativo, que lleve al modelo del profesional que se necesita formar en nuestra sociedad. Una forma de superación, que ha contribuido a la preparación de profesores, de la enseñanza superior, es el trabajo metodológico gestionado en diferentes niveles estructurales, esencialmente en el de universidad, carrera y año académico, este último nivel constituye la célula esencial para gestionar la educación en valores.

4.2 Año académico, célula esencial del proceso de gestión de la educación en valores

El análisis anterior evidencia que estos tres niveles tienen una estrecha relación dialéctica, extrapolándose a relaciones de coordinación, yuxtaposición, cooperación, subordinación, comunicación, respecto a la gestión de la educación en valores. Cada uno con un encargo delimitado en correspondencia con su papel y funciones, respondiendo a los objetivos del modelo del profesional. Pero se complementan entre sí, lo que supone la reiteración de funciones en los diferentes niveles, que no impide que tribute a otras de igual importancia como son socializar, intercambiar, divulgar, orientar y contextualizar.

Educar en valores atraviesa todas las áreas de la universidad: lo académico, investigativo-laboral y extensionista. Su desarrollo exige la preparación de profesores, gestionada con el trabajo metodológico desarrollado en el año académico, atendiendo a su integración en las áreas o procesos sustantivos y a las dimensiones en que se desarrolla. Su punto de partida es la docencia, dirigida a optimizar el proceso formativo integral, con métodos que permitan establecer relaciones afectivas entre los sujetos, el liderazgo de sus miembros, la pertenencia y responsabilidad de los estudiantes y las decisiones colectivas.

Al reconocer el año académico como la célula esencial del proceso de gestión, de la educación en valores, se hace explícito en este nivel estructural como una acción primordial para el éxito en la formación integral de los estudiantes. Entre las insuficiencias del proceso se identifica la necesidad de preparación del profesor universitario, para lograr articular en el proyecto educativo las acciones de manera consciente y personalizada, dada la carencia de una estrategia educativa bien fundamentada, lo que indicaba que no se alcanzaran los resultados deseados en el proceso de formación de los estudiantes. La estrategia educativa en el año académico es un documento rector, que se espera contenga como punto de partida el diagnóstico integral de estudiantes, profesores y proceso. Incluye la gestión del trabajo metodológico, el proyecto educativo con sus dimensiones o esferas de influencia y la gestión de las acciones de comunicación (Fig. 1).

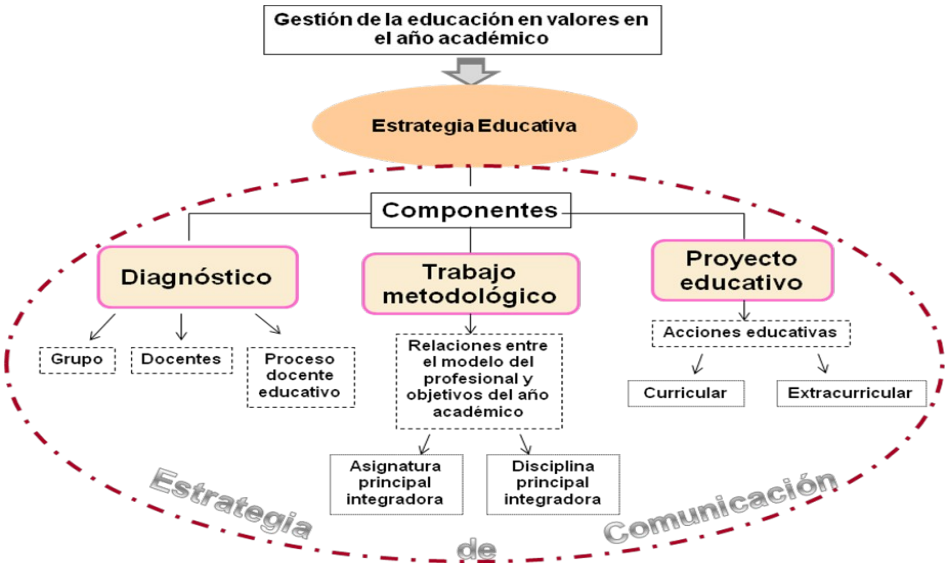


Fig. 1. Gestión de la educación en valores en el año académico.

De la discusión previa se encuentra necesario enfatizar en el plan de trabajo metodológico para el año académico, como una de las acciones de preparación del profesor universitario para el proceso de gestión de la educación en valores. Concebir este plan, requiere tener presentes los fundamentos de los problemas metodológicos principales a tratar, a partir del diagnóstico y líneas prioritarias del año académico, objetivos metodológicos principales (según la planeación, organización, ejecución y control), actividades metodológicas a desarrollar, designación de responsables y planeación de fechas de cumplimiento (con reuniones metodológicas, clases metodológicas, clases abiertas y talleres) y el plan de control al proceso de enseñanza-aprendizaje.

5. Conclusiones

A partir de la discusión desarrollada, y del análisis de las fuentes citadas se obtienen las siguientes conclusiones básicas:

El proceso de gestión de la educación en valores constituye un proceso esencial e integrador en torno a la necesidad de una formación integral de la personalidad del estudiante. Sus insuficiencias se reflejan en la preparación de los profesores para acometer la tarea, esta debe estar soportada, por el trabajo metodológico mediante la articulación de un plan en el año académico, como célula esencial y forma de gestión de la didáctica, y de preparación del profesor universitario.

La gestión de la educación en valores del año académico se concreta mediante la estrategia educativa, documento rector cuyo punto de partida debe ser el diagnóstico integral de estudiantes, profesores y proceso; que incluye la gestión del trabajo metodológico, el proyecto educativo con sus dimensiones o esferas de influencias y la gestión de las acciones de comunicación.

6. Bibliografía

1. Ackerman, E. “From De-contextualized to Situated Knowledge: Revisiting Piaget´s Water-Level Experiment”. pp. 367-379, En Constructionism. Ablex Publishing Corporation, 1991.
2. Obaya, A., El construccionismo y sus repercusiones en el aprendizaje asistido por computadora. Contactos. V. 48, 61-64 (2003).
3. Valera, O, Estudio crítico de las principales corrientes de la Psicología contemporánea, Zuamer Editores, 1995.
4. Freudenthal, H., Problemas fundamentales de la educación matemática. Contactos. V. 42, 11-22 (2001).
5. Colectivo de autores, Pedagogía. Pueblo y Educación, 1984
6. Blanco Pérez, A., Introducción a la Sociología de la educación. Pueblo y Educación, 2001.
7. Ayala, M. D., En busca del método para mejorar el aprendizaje y la enseñanza (experimental) Parte I, Contactos. V. 41, 30-44 (2001).
8. Brezinka, W., La educación en una sociedad en crisis. Narcea, S.A. de Ediciones, 1990
9. Chacón, N., Dimensión Ética de la Educación Cubana. Pueblo y Educación, 2002.
10. Colectivo de autores, ”El trabajo educativo en la institución escolar”, Capítulo 1, La labor educativa en la escuela. Pueblo y Educación, 2002
11. Parra, J. M., La educación en valores y su práctica en el aula. Tendencias Pedagógicas 8, 69-88 (2003).
12 Báxter, E., Educar en valores. Tarea y reto de la sociedad. Ciudad de La Habana: Pueblo y Educación, 2007.
13. Jaime, G. M., Una concepción pedagógica del proceso de gestión del trabajo educativo. Estrategia para su implementación en la Universidad de Pinar del Río. Tesis, Doctorado en Ciencias Pedagógicas. Pinar del Río, Cuba: 2014.
14. Vigotsky, L. S., Historia del Desarrollo de las Funciones Psíquicas Superiores. Científico –Técnica, 1987.
15. Vigotsky, L. S., Pensamiento y Lenguaje., Pueblo y Educación, 1985.
16. Klingberg, L., Introducción a la Didáctica General. Pueblo y Educación, 1972.
17. Makarenko, A., La colectividad y la educación de la personalidad. Pueblo y Educación, 1979.
18. Danilov M. A. y Skatkin M. N., Didáctica de la Escuela Media. Libros para la Educación, 1980.
19. Talízina N., Psicología de la enseñanza. Progreso, 1988.
20. Álvarez de Zayas, C., Pedagogía como ciencia. Epistemología de la educación. Pueblo y Educación, 1998.
21 Castellanos, D., et al., Hacía una concepción de aprendizaje desarrollador, Colección Proyectos. ISPEJV, 2000.
22. Sierra, R. A., La estrategia pedagógica, su diseño e implementación. Pueblo y Educación, 2008.

23. Rico, P., et. al., Exigencias del Modelo de escuela primaria para la dirección por el maestro de los procesos de educación, enseñanza y aprendizaje. Pueblo y Educación, 2008
24. Silvestre, M. y Zilberstein, J., Hacia una didáctica desarrolladora. Pueblo y Educación, 2002.
25. Papert, S. y Harel, I., Constructionism. Ablex Publishing Co., 1991.
26. Drucker, P. The practice of management . Harper & Row, 1954.
27. Muguercia, P. y otros, Teoría general de la dirección socialista. MES, 1982.
28. Bringas, J A., Propuesta de modelo de Planificación Estratégica Universitaria. Tesis, Doctorado en Ciencias Pedagógicas. ISP. Enrique José Varona, 1999.
29. Murcia, N., Gerenciando con visión. Proyectando el éxito, en la Nueva Gerencia y la filosofía de la alta dirección. Dpto. De estudios de Dirección, CUBALSE, 2001.
30. Pozner, P., Gestión Educativa Estratégica. Módulo 2: Competencias para la profesionalización de la gestión educativa, www.iipe-buenosaires.org.ar.
31. Alarcón, R. y Sánchez, R., Actualización del Enfoque Integral para la Labor Educativa y Político-Ideológica en la Universidad. MES-ENPSES, 1999.

El intercambio educativo como vía para incrementar el poder blando de México

Quintana D. María Berenice[1], Rodríguez Q. Berenice Georgina[2], Ortega H. María Antonieta[3], Ambriz G. Juan José[4].

[1]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email mbqd@azc.uam.mx,

[2]Prolongación Paseo de la Reforma # 880, Lomas de Santa Fe C.P.01219,email berenicegrodriguez@gmail.com

[3]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email maor@azc.uam.mx

[4]Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco #186, Vicentina C.P.09340, email agj@xanum.uam.mx

1.Resumen

La necesidad obtener nuevos conocimientos sobre procesos técnicos, culturales, económicos y políticos en el ámbito de la interrelación entre países y de cooperación con otros estados, organizaciones no gubernamentales e instituciones científicas, conlleva, a ejercer y ganar poder blando por parte del gobierno. Una forma de obtenerlo es la educación, impulsando los intercambios educativos. Este trabajo es un estudio de caso del intercambio en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad

Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco. El intercambio ha aumentado conforme transcurre el tiempo, en un principio se daba con países latinoamericanos y últimamente con países como Francia y Alemania, lo que supone un mejor escenario. La influencia de este intercambio en el poder blando del país es reducida, sin modificar la imagen del país al exterior. La movilidad de estudiantes extranjeros hacia la Universidad Autónoma Metropolitana contribuye a crear una mejor imagen de la Institución en el escenario internacional.

2.Introducción

El poder está sumergido en la estructura social y si se quiere entender se debe examinar desde prácticas específicas que se desarrollan en una sociedad establecida y durante una época determinada [1].

El concepto de poder blando (soft power) se puede resumir en la capacidad de lograr que otros ambicionen lo que uno ambiciona [2:30]. Indicando la existencia de factores inmateriales no controlados por el Estado, que tienen la capacidad de contribuir tanto o más que la presión militar y la coerción económica (poder duro, hard power) al logro de los objetivos establecidos por una nación [3].

La noción de poder blando comprende dos capacidades: la capacidad de atracción (persuasión), desde fuera del actor hacia adentro y la capacidad de configurar las preferencias (ideología), desde dentro hacia afuera.

De esta manera, un país puede lograr los resultados que busca en política internacional sí otros países están dispuestos a seguirlo - admirando sus valores, emulando su ejemplo, anhelando su nivel de prosperidad y apertura [4].

Nye establece como indicadores del poder blando

- Alumnos extranjeros e investigadores en Universidades
- Libros publicados
- Premios nobel
- Publicación de artículos científicos

El poder blando es un subproducto social, es un proceso progresivo que proporciona resultados a largo plazo debido a que está vinculado a la aceptación de los individuos y a la construcción de una imagen. Esta imagen ayudará al país a promover un mejor posicionamiento en la comunidad global para conseguir de esta manera un acercamiento a los países más poderosos e influyentes y garantizar alianzas económicas, de infraestructura, de educación y de transmisión de tecnología [5].

Una de las maneras en cómo el gobierno puede ejercer y ganar el poder blando en el contexto internacional es a través de la educación, cuyos esfuerzos pueden verse influidos de manera positiva o negativa por la postura, actitudes y acciones de los individuos o grupos de la sociedad civil, ya que la sociedad como un todo está presente

en el interior de cada individuo, en su lenguaje, su saber, sus obligaciones, sus normas [6].

Las estrategias y recursos se dirigen a los estudiantes de nivel superior e investigadores en la Universidad, que a través de sus acciones son capaces de obtener prestigio científico y educativo adaptado al contexto nacional e internacional actual. No obstante, la promoción de intercambios educativos dependerá de la conversión exitosa de este recurso en atracción efectiva, de una respuesta positiva y esperada por parte de los estudiantes extranjeros y la consecución de intereses y objetivos.

Al fundamentarse en el ejercicio de la atracción, requiere la utilización de bienes intangibles como la persuasión a través de ideas atractivas, de personalidades, de discursos, de un buen servicio educativo, cuyo propósito sea generar atracción de estudiantes extranjeros a partir de una población formada bajo una educación completa y de calidad que incremente el acervo cultural y de conocimiento de la nación y que se posicione como modelo a seguir en los estándares universales. Además de catalogar a las universidades del país dentro de los primeros lugares de las clasificaciones mundiales.

Esto se logrará a través de la cooperación con otros Estados, organizaciones no gubernamentales, instituciones científicas u otras organizaciones internacionales como la Organización de Naciones Unidas, que se postulan como los encargados de proteger intereses públicos más allá de lo que puede alcanzar los esfuerzos promovidos por un Estado.

3.Condiciones experimentales

Es una investigación de caso, que explora los alcances del intercambio educativo en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería, de la Universidad Autónoma Metropolitana-Unidad Azcapotzalco para el periodo 2011-2017[7]. Cuyo propósito es establecer la cantidad de estudiantes extranjeros que vienen a estudiar a la Universidad, además de ofrecer un panorama de la influencia que tiene este hecho tanto en la imagen de la Institución, como en el logro del poder blando alcanzado por el país. La información proporcionada por la institución es: la cantidad de estudiantes extranjeros a nivel licenciatura y posgrado que optan por realizar sus estudios, el país de origen, área disciplinar de su elección y el programa de movilidad utilizado por ellos.

4.Resultados y discusión

De los indicadores antes mencionados;

- Premios Nobel, tres mexicanos han ganado este premio. Alfonso García Robles (Nobel de La Paz,1982), Octavio Paz (Nobel de Literatura, 1990), José Mario Molina Pasquel y Henríquez (Nobel de Química,1995).
- Libros publicados, se tiene una mayor producción de publicaciones científicas.
- Publicación de artículos científicos, ha ido en aumento tanto en cantidad como en calidad e impacto. Resultado de la labor de los profesores e investigadores de las diferentes Instituciones de Educación Superior.

- Investigadores en universidades, es práctica común el intercambio de académicos entre Instituciones de Educación Superior debido a las redes de conocimiento.

De esta manera, se tratará específicamente el indicador correspondiente a alumnos extranjeros de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de la Universidad Autónoma Metropolitana- Unidad Azcapotzalco.

En la figura 1, se muestran los estudiantes extranjeros que optaron por estudiar en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería durante el periodo de 2011 - 2017. Cabe mencionar que el número de estudiantes es variable en los diferentes años con un aumento significativo el último año, pues pasó de 9 estudiantes de licenciatura en 2011 a más de 70 estudiantes en 2017. La participación de estudiantes de posgrado ha sido muy baja pues es tan sólo de uno o dos por año.



Figura 1. Estudiantes extranjeros de intercambio académico.

Este comportamiento indica que la Universidad tiene mayor presencia en los diversos programas de movilidad y en consecuencia una colaboración más estrecha con otras Instituciones de Educación Superior.

El lugar de procedencia de los estudiantes extranjeros que llegan a realizar estancia educativa a nivel licenciatura incluye tanto países latinoamericanos (Argentina, Brasil, Chile, etc.) como de la Unión Europea (Francia, Alemania, etc.) (Figura 2).



Figura 2. Procedencia de los estudiantes extranjeros de licenciatura.

En 2011 los estudiantes de intercambio procedieron principalmente de Argentina, Colombia, Chile y de países de la Comunidad Europea como España y Francia. Para 2012, provinieron de Argentina, Brasil, Colombia, España y Francia. En 2013, hubo estudiantes extranjeros de Brasil, Colombia, Paraguay, Perú y España. En 2014, contamos con estudiantes de Argentina, Colombia, Chile Perú, Alemania y España. En 2015, el intercambio se realizó con Colombia, Chile y España. Para 2016, los estudiantes aceptados fueron de Argentina, Colombia, Chile, Perú, Venezuela, España y Alemania. Finalmente, en 2017 hubo estudiantes de Colombia, Chile, Ecuador, Perú, Venezuela, Alemania, España, Italia y Francia. En este último año se aprecia el incremento del intercambio con países de la Unión Europea. Así como un mayor número de estudiantes procedentes principalmente de Colombia, España y Venezuela.

La cantidad de estudiantes extranjeros que vienen a realizar estudios de posgrado es menor pues ha sido únicamente de uno o dos por año (Figura 3).

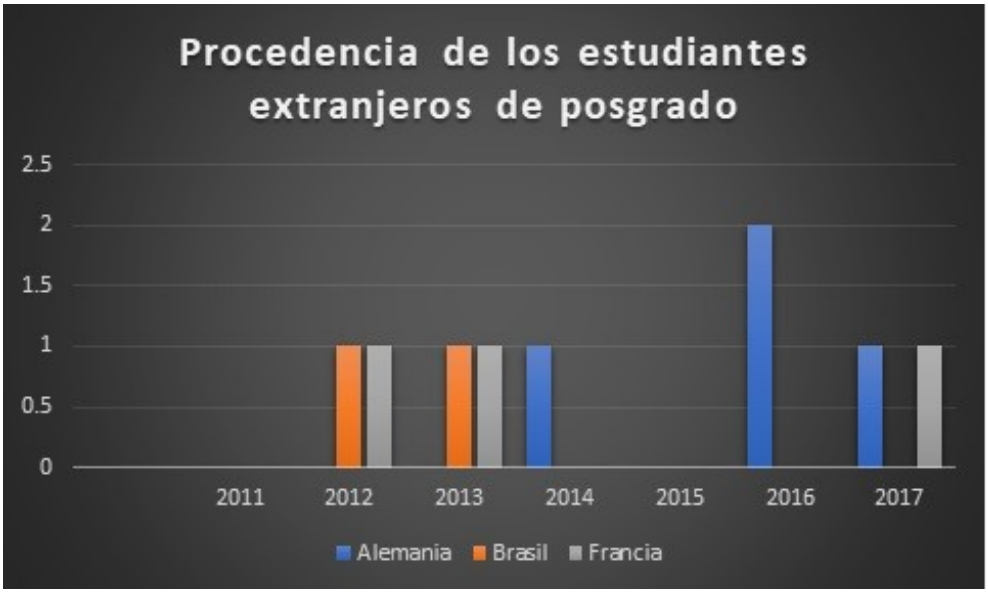


Figura 3. Procedencia de los estudiantes extranjeros de posgrado.

En un principio los estudiantes de posgrado que elegían a la Universidad para una estancia de estudios o investigación eran principalmente de Brasil y después de países de Alemania y Francia, lo que permite una mayor cooperación académica y la conformación conjunta de proyectos de investigación.

Este intercambio varía dependiendo de las diversas áreas de estudio, a continuación, se presenta la elección de los estudiantes de nivel licenciatura por las diversas ingenierías que ofrece la Universidad (Figura 4).



Figura 4. Distribución de estudiantes extranjeros por ingeniería.

La disciplina con mayor demanda es Ingeniería Industrial que se relaciona con el diseño de instalaciones para la manufactura, el control de la producción, las mejoras en los métodos, la medición del trabajo, el control de calidad, principalmente. En segundo lugar, se ubica la licenciatura en Ingeniería Ambiental que se enfoca al estudio, evaluación y resolución técnica de problemas ambientales, ocasionados por diversas actividades del ser humano. Le sigue en solicitudes la licenciatura en Ingeniería Civil que aplica sus conocimientos y técnicas para planear, construir, operar, conservar y administrar las obras de infraestructura y de servicios que la sociedad demanda. A continuación, está la licenciatura en Ingeniería Mecánica que se ocupa de diseñar, construir, evaluar, optimizar dispositivos, máquinas o sistemas transformadores de la energía disponible, en formas aprovechables por la sociedad.

La elección de las otras ingenierías se realiza en menor medida, Ingeniería Química que atiende el diseño, control, simulación, adecuación y optimización de procesos que transforman la materia en productos útiles a la sociedad e Ingeniería Física que se orienta al diseño, planeación, control y evaluación de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico.

La selección de los estudiantes extranjeros de nivel posgrado abarca la Maestría en Ciencias e Ingeniería Ambiental, la Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales y la Maestría y Doctorado en Ingeniería de Procesos (Figura 5).



Figura 5. Distribución de estudiantes extranjeros de posgrado por área de estudio.

Como puede observarse, es insignificante el número de estudiantes extranjeros que deciden realizar sus estudios de posgrado en la Universidad. Esto puede explicarse por diversas razones: a) porque los estudiantes prefieren realizar dichos estudios en universidades con un mejor ranking a nivel internacional, b) la existencia de un intercambio permanente de estudiantes extranjeros en Instituciones de Educación Superior Privadas, c) lo atractivo que resultan los programas y planes de estudios institucionales, d) la cantidad de convenios con los que cuenta cada Institución de Educación Superior, etc.

El intercambio entre la Universidad Autónoma Metropolitana y las Instituciones de

Educación Superior es posible gracias al apoyo de diversos programas de movilidad, que tienen como principales objetivos: promover la internacionalización de las Instituciones de Educación Superior, enriquecer la formación académica de las comunidades universitarias, impulsar la colaboración solidaria entre las instituciones.

Los Programas de Movilidad utilizados por los estudiantes son: Programa Bilateral; Programa Académico de Movilidad Educativa-Unión de Universidades de América Latina y el Caribe (PAME-UDUAL) [8]; Programa de Intercambio Universitario-Centro Interuniversitario de Desarrollo (CINDA) [9] y Programa Jóvenes de Intercambio México-Argentina (JIMA) [10] (Figura 6).

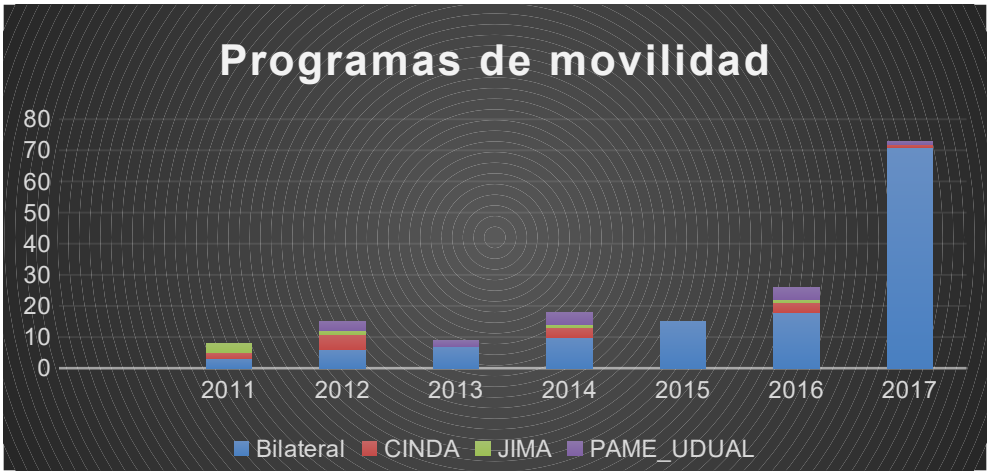


Figura 6. Programas de movilidad elegidos por los estudiantes extranjeros.

En términos generales se cumplen los objetivos propuestos por estos programas, ya que se genera la movilidad de los estudiantes de licenciatura y posgrado, se promueven las Instituciones de Educación Superior y se impulsa la cooperación interinstitucional fomentando la internacionalización.

Es evidente que la UAM ha ido consolidando el Programa Bilateral, que le permite tener una mayor colaboración académica tanto con los países latinoamericanos como con los países de la Unión Europea, logrando una mayor presencia a nivel internacional.

El intercambio académico ha aumentado con el paso del tiempo y puede seguir este comportamiento si se estrecha en mayor medida la colaboración con más Instituciones de Educación Superior que tengan metas y objetivos comunes.

Al ser la Universidad en cierta manera espejo de nuestra sociedad, la Universidad tendrá que ser más flexible para adaptarse a las necesidades de la sociedad y preverlas. Debe producir y valorar nuevos conocimientos en el ámbito cultural, social y económico. Lo que le permitirá tener una mayor presencia y participación a nivel internacional.

5.Conclusiones

A partir de la información expuesta, no podemos expresar que el intercambio educativo mejora sustancialmente la imagen de México al exterior. Sin embargo, enriquece la formación profesional, el intercambio del saber y la creación de redes de intercambio de conocimiento que permiten la resolución de problemas de los países implicados. Contribuyendo en forma modesta a la obtención del poder blando, al lograrse una mejor percepción de la propia Universidad y quizá del país.

Existe un incremento del poder blando en México a través de su afiliación y participación en Organizaciones Internacionales, su atractivo turístico, su gastronomía, la cantidad de centros culturales del país en el extranjero, su producción artística, su producción musical, su producción cinematográfica, entre otros. Sin embargo, la imagen del país al exterior está dominada por los acontecimientos políticos y sociales que tienen una mayor difusión a nivel internacional a través de los medios de información y comunicación.

La movilidad estudiantil depende del desempeño estudiantil, qué a su vez, es función de la efectividad de los sistemas educativos previos y del estatus socioeconómico de los padres fundamentado en su riqueza material y cultural.

La experiencia de la movilidad en el estudiante, implica por un lado en un cambio de mentalidad en la persona, y por el otro, en un conocimiento más amplio de otros sistemas educativos, otras culturas. Enriqueciendo su desarrollo personal.

6.Bibliografía

[1] Foucault, Michael (2005), *La hermenéutica del sujeto,* Madrid, Ediciones Akal.

[2] Nye, Joseph S. (2003), *Soft Power: The Means to Success in World Politics,* New York. Public Affairs.

[3] Torres Soriano, R. (2005), El poder blando: ¿una alternativa a la fuerza militar? *Política y Estrategia.* No. 100.

[4] Nye, Joseph S. (2003), *La paradoja del poder norteamericano.* Madrid, Taurus.

[5] Morin, Edgar (1999), *Los siete saberes necesarios para la educación del futuro.* UNESCO, Santillana.

[6] Rodríguez, Mariana (2017), *Descifrando la importancia del poder blando en el Siglo XXI a partir de su medición*, Tesis Licenciatura, Instituto Tecnológico Autónomo de México (ITAM).

[7] UAM-División de Ciencias Básicas e Ingeniería (2017), *Lineamientos Divisionales para la Movilidad de alumnos y participantes de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería,* México. UAM-DCBI.

[8] Unión de Universidades de América Latina y el Caribe (2006), "Programa académico de Movilidad Educativa-Unión de Universidades de América Latina y el Caribe", en: http://pame.udual.org/datos.html.

[9] Centro Interuniversitario de Desarrollo (1971), "Programa de Intercambio Universitario", en: http://www.cinda.cl/programa de movilidad/

[10] ANUIES-CIN (2005), "Programa Jóvenes de Intercambio México-Argentina". http:www.jima.anuies.mx

Movilidad educativa de estudiantes de ingeniería en la Universidad Autónoma Metropolitana

Quintana D. María Berenice[1], Rodríguez Q. Berenice Georgina[2], Ortega H. María Antonieta[3], Ambriz G. Juan José[4].

[1]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email mbqd@azc.uam.mx,

[2]Universidad Iberoamericana. Prolongación Paseo de la Reforma # 880, Lomas de Santa Fe C.P.01219,email berenicegrodriguez@gmail.com

[3]Universidad Autónoma Metropolitana-Azcapotzalco, Av. San Pablo # 180, Reynosa Tamaulipas C.P. 02200, email maor@azc.uam.mx

[4]Universidad Autónoma Metropolitana-Iztapalapa, Av. San Rafael Atlixco #186, Vicentina C.P.09340, email agj@xanum.uam.mx

1. Resumen

La movilidad estudiantil es una faceta de la internacionalización de las universidades como respuesta al impacto de la globalización, representa una forma de promoción y reforzamiento de la identidad cultural que coadyuva en la comunidad universitaria el desarrollo de una visión global. El objetivo de este trabajo es mostrar la movilidad de estudiantes de las carreras de Ingeniería, Unidad Azcapotzalco periodo (2011-2017) y Unidad Iztapalapa periodo (2015-2017) de la Universidad Autónoma Metropolitana y su impacto en la internacionalización de la institución. En un principio esta movilidad se realizó con universidades latinoamericanas y algunas universidades europeas, últimamente el intercambio ha aumentado por las alianzas de la institución con otras universidades. En cuanto a la experiencia del estudiante a nivel personal, se aprecia un cambio de pensamiento con respecto a otras culturas, costumbres, modos de pensar, etc. Además de la capacidad que tienen los estudiantes para adaptarse a otros lugares y sistemas educativos.

1. Introducción

El escenario mundial al final del siglo XX, marca la necesidad de adquirir nuevos conocimientos sobre procesos técnicos, económicos, culturales y políticos, lo que conlleva a una creciente diversificación de la práctica educativa de nivel superior. Para la UNESCO, una manera de impulsar estrategias de desarrollo es fomentando la cooperación y el intercambio educativo, formalizadas en la Declaración Mundial sobre Educación Superior en el Siglo XXI de la Conferencia Mundial sobre Educación Superior [1].

En dicha Declaración se señala, “Es imprescindible para toda sociedad una educación superior renovada para afrontar los desafíos del siglo XXI, para garantizar su autonomía intelectual, para producir y hacer avanzar los conocimientos y educar y formar ciudadanos responsables y conscientes, y especialistas cualificados, sin los cuales ninguna nación puede progresar en el plano económico, social, cultural ni político. La educación superior y la investigación son en la actualidad los componentes esenciales del desarrollo cultural, socioeconómico y ecológicamente viable de los individuos, las comunidades y las naciones” [1, 1998:8].

Atendiendo a estas recomendaciones, en México, la Asociación Nacional de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES), define políticas que orientaron el desarrollo de la educación superior. Con una visión del Sistema de Educación Superior bajo los siguientes postulados: calidad e innovación, congruencia con su naturaleza académica, pertinencia en relación con las necesidades del país, equidad, humanismo, compromiso con la construcción de una mejor sociedad, autonomía responsable de las Instituciones de Educación Superior (IES), estructuras de gobierno y operación ejemplares de Instituciones de Educación Superior [2].

Para lograr la transformación del Sistema de Educación Superior, uno de los programas propuestos es el “Programa de Redes y Movilidad en las IES, en las que el variado conjunto de actividades de cooperación científica y técnica y el intercambio académico, tanto nacional como internacional, se reconozcan como actividades estratégicas para el

mejoramiento del conjunto, y se cuente con mecanismos de cooperación entre las IES, sobre todo entre las del mismo ámbito regional o local, favoreciendo el aprovechamiento óptimo de los recursos" [3, 2000:7].

La Universidad Autónoma Metropolitana (UAM), promueve la colaboración académica, científica y cultural con otras IES nacionales o extranjeras, mediante el intercambio académico y la movilidad estudiantil. Sin embargo, en sus nuevas Unidades Cuajimalpa y Lerma (fundadas en 2005 y 2009 respectivamente) la movilidad estudiantil forma parte de los requisitos a cumplir en los programas de estudio.

La movilidad estudiantil se comprende como la incorporación de los estudiantes de la UAM en los programas de estudio de otras IES para cursar y acreditar unidades de enseñanza-aprendizaje que son reconocidas como propias. Permitiendo incrementar el nivel escolar, perfeccionar la formación integral, ampliar la visión y complementar los conocimientos y habilidades profesionales del estudiante.

De tal manera, que el intercambio de experiencias con alumnos de otras instituciones o culturas se oriente a favorecer la equidad, el desarrollo del pensamiento crítico, a fortalecer la capacidad de adaptación y a promover la dimensión nacional e internacional del conocimiento, que incurra en la formación de profesionales e investigadores que coadyuven al patrimonio económico, social y cultural de las comunidades. Proporcionando cambios significativos en quienes viven la experiencia.

En concordancia con lo expresado por la UNESCO, que establece que las IES deben adaptarse a las necesidades sociales y preverlas. Sobre todo, en países en desarrollo, en los que es apremiante establecer nuevos modelos universitarios más adecuados a las necesidades y susceptibles de favorecer sinergias disciplinarias y geográficas, así como actividades de cooperación en el plano regional e internacional [4].

La Universidad asume la importancia de la movilidad de alumnos a partir de Programas de Movilidad para cada una de las Divisiones Académicas, para la formación de profesionales e investigadores con una extensa percepción del mundo y una mejor capacidad de adaptación a los cambios [5].

2. Condiciones experimentales

La metodología que se desarrolla en este trabajo responde a una investigación cualitativa con un método descriptivo, que tiene como finalidad definir, clasificar, caracterizar la movilidad estudiantil en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería, de la Unidad Azcapotzalco para el periodo 2011-2017 y de la Unidad Iztapalapa para el periodo 2015-2017 en la Universidad Autónoma Metropolitana (UAM). Cabe aclarar que los periodos son diferentes, debido a la información oficial disponible.

La información se obtiene de la Oficina de relaciones universitarias, datos del Programa de movilidad estudiantil de la División de Ciencias Básicas e Ingeniería de las Unidades Azcapotzalco e Iztapalapa. La información proporcionada comprende: el número de estudiantes de licenciatura y posgrado en las estancias de movilidad, las ramas del

conocimiento a las que pertenecen, las Instituciones de Educación Superior de intercambio, programas de intercambio seleccionados para realizar la movilidad.

Con la finalidad de establecer si se logra una mejor formación profesional, se realizaron entrevistas a los estudiantes que realizaron estancias de movilidad. Las preguntas que se formularon son:

1.- Conocimientos académicos y habilidades requeridos para su estancia de movilidad.

2.- Conocimientos académicos y habilidades adquiridos durante la estancia de movilidad.

3.- Cuáles son los aspectos positivos del proceso de movilidad.

4.- Cuáles son los aspectos negativos del proceso de movilidad.

5.- Evaluación general del proceso de movilidad.

6.- Cómo impacta la estancia de movilidad en su formación profesional y personal.

3. Resultados y Discusión

El estudiante que solicite participar en el Programa de Movilidad deberá cumplir con los requisitos establecidos en la convocatoria junto con los siguientes criterios:

a) Haber acreditado al menos tres unidades de enseñanza-aprendizaje (UEA) en cada uno de los siguientes periodos:
    - Trimestre inmediato anterior a la presentación de la solicitud
    - Trimestre en que se presenta la solicitud
    - Trimestre previo a la movilidad
b) Postular al menos tres UEA a cursar en la universidad receptora que sean acordes a la seriación curricular del plan de estudios que cursa.
c) Las UEA postuladas no deberán estar inscritas, ni haber sido acreditadas, ni haberlas reprobado.
d) No exceder los créditos permitidos de acuerdo con el Plan de Estudios de cada licenciatura.
e) Tener acreditado al menos el 50% y como máximo el 70% de los créditos de su Plan de estudios. Este requisito no se aplica para el posgrado, en cuyos casos se considera lo especificado en la convocatoria.
f) Contar con la documentación que determine la convocatoria.
g) Contar con todos aquellos requisitos adicionales que se indiquen en las convocatorias respectivas y planes de estudio vigentes.
h) La estancia de movilidad no podrá ser mayor a 6 meses o dos trimestres consecutivos.
i) En cuanto al promedio de calificaciones tiene que ser mínimo de B.
j) Tener pasaporte con vigencia de al menos un año o la cita para su trámite.

Requisitos a cubrir una vez que el alumno ha sido aceptado:

a) Para movilidad nacional, contar con un seguro de gastos médicos con cobertura nacional. Para movilidad internacional: contratar un seguro médico con cobertura que corresponda con el país de la universidad receptora o cualquier otro que sea solicitado por ésta.
b) Tener pasaporte con vigencia de al menos un año.
c) Tramitar la documentación migratoria pertinente, en su caso.

La primera limitante que tiene el estudiante para ingresar al programa, es su desempeño académico seguida por los requisitos solicitados en la convocatoria de la IES elegida.

En las figuras 1 y 2, se muestran los estudiantes en el Programa de Movilidad a nivel licenciatura para la Unidad Azcapotzalco y para la Unidad Iztapalapa.

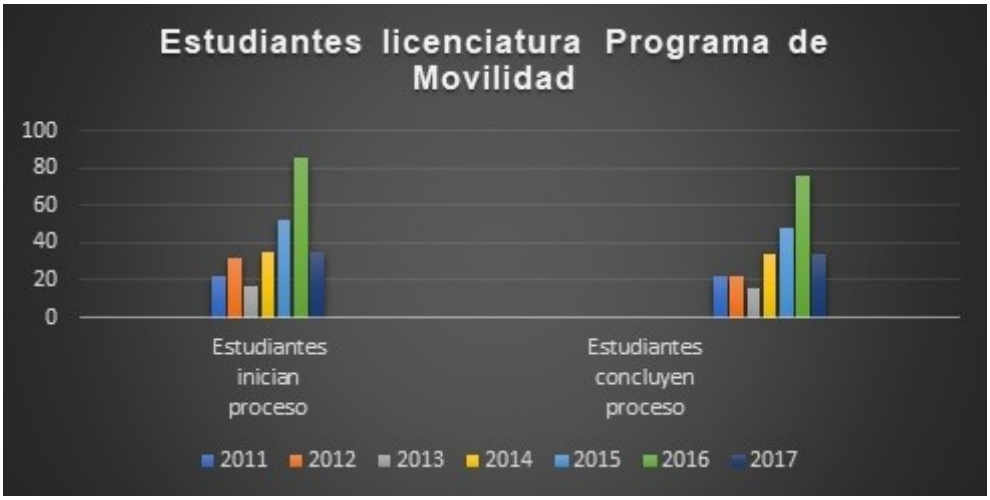


Figura 1. Estudiantes de licenciatura en el Programa de Movilidad en Unidad Azcapotzalco.

La movilidad de los estudiantes a nivel licenciatura es preferentemente a países latinoamericanos y en menor medida a países Comunidad Europea, debido al requisito de dominar un idioma extranjero.



Figura 2. Estudiantes de licenciatura en el Programa de Movilidad en Unidad Iztapalapa.

En la Unidad Iztapalapa, la movilidad se da en la misma proporción tanto para países latinoamericanos como para aquellos países de la Unión Europea y Nórdicos. Se observa que a pesar de que todos los estudiantes concluyen el programa. Hay una disminución de estudiantes que optan por esta opción.

La movilidad de los alumnos de licenciatura adquiere mayor importancia cuando el estudiante es apoyado con becas proporcionadas por algún organismo gubernamental (Secretaría de Educación Pública, Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología) o por otras instituciones de educación superior (UAM, universidades nacionales o extranjeras).

En la Unidad Azcapotzalco, los estudiantes de nivel licenciatura que renuncian a continuar con los trámites se debe: al rechazo por parte de la institución de educación superior seleccionada, o siendo aceptados por cuestiones personales (miedo a estar en un lugar extraño, desconfianza de sus capacidades) (0 a 7.7% de la cantidad inicial durante el periodo). Y aquellos que no siguen con proceso por limitaciones presupuestales, laborables y familiares (0 a 21.8% de la cifra inicial durante el periodo) (Figura 3).

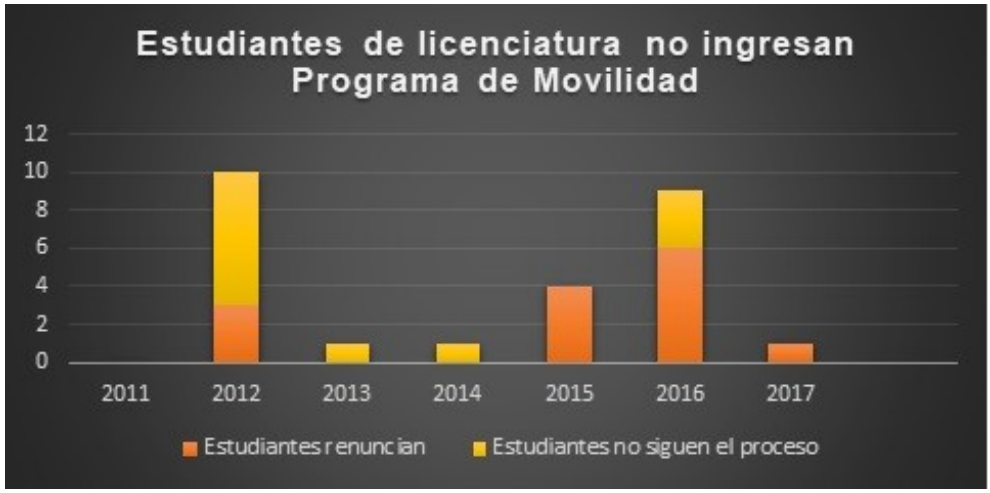


Figura 3. Estudiantes que no ingresan al Programa de Movilidad en Unidad Azcapotzalco.

En la figura 4 se presenta la movilidad de estudiantes para las diversas disciplinas.

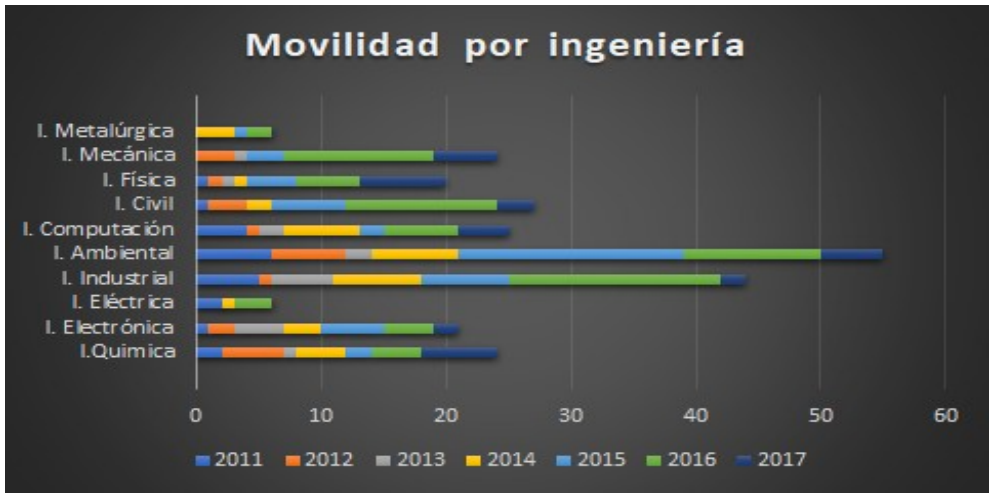


Figura 4. Estudiantes de movilidad por disciplina en Unidad Azcapotzalco.

Inicialmente, el número de estudiantes que optaban por la movilidad es casi el mismo para algunas ingenierías. Sin embargo, con el paso del tiempo, las ingenierías presentan diferentes porcentajes de movilidad: Ingeniería Ambiental (21.9%), Ingeniería Industrial (17.5%), Ingeniería Civil (10.8%), Ingeniería en Computación (9.9%) Ingeniería Mecánica e Ingeniería Química (9.6% respectivamente), Ingeniería Electrónica (8.3%), Ingeniería Física (7.9%), Ingeniería Eléctrica (2.4%), Ingeniería Metalúrgica (2.0%).

Para la Unidad Iztapalapa (Figura 5), los estudiantes que optan por el proceso de movilidad pertenecen principalmente a Ingeniería en Energía (41.1%), seguida por Ingeniería Biomédica (27.5%), Ingeniería Química (21.6%) y por último Computación (9.8%).

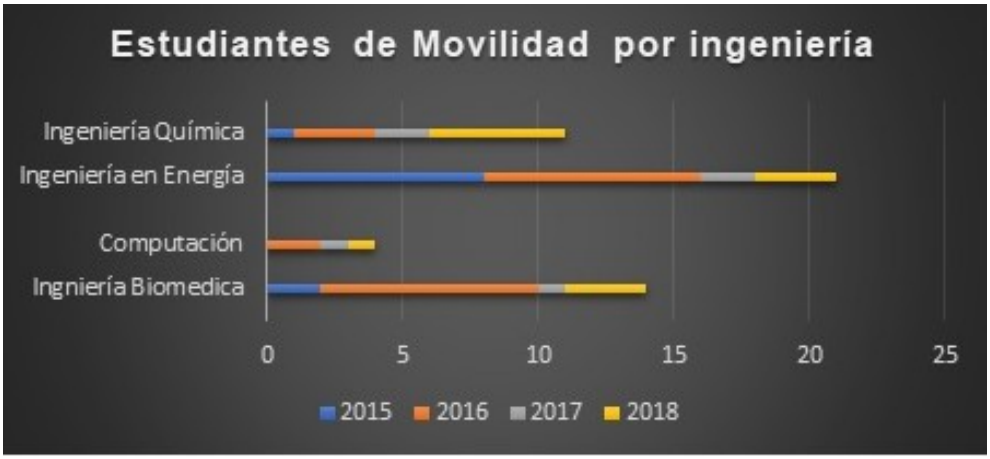


Figura 5. Movilidad de estudiantes de las diversas ingenierías Unidad Iztapalapa.

En la figura 6, se muestra los estudiantes de posgrado en el Programa de Movilidad de la Unidad Azcapotzalco. En la Unidad Iztapalapa, se reporta en 2015 sólo la movilidad de un estudiante de la Maestría en Energía y Medio Ambiente a Alemania.



Figura 6. Estudiantes de posgrado en el Programa de Movilidad en Unidad Azcapotzalco.

La movilidad es internacional, debido a que el estudiante domina un idioma extranjero y generalmente cuenta con una beca que le ayuda a solventar sus gastos. Todos los estudiantes que ingresan al programa lo concluyen, con excepción de un estudiante en 2012.

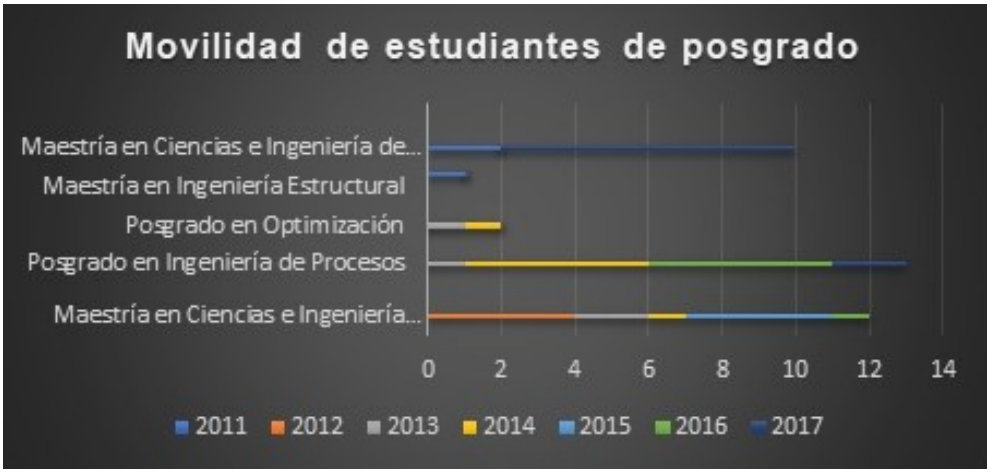


Figura 7. Cantidad de estudiantes de los diferentes posgrados que realizan estancias de investigación en Unidad Azcapotzalco.

En la figura 7 se presenta la cantidad de estudiantes de los diversos posgrados en la Unidad Azcapotzalco que realizan estancias de investigación.

El intercambio de estudiantes depende en gran medida de los programas de movilidad y del país receptor. Los programas seleccionados por los estudiantes son: Bilateral, Programa Académico de Movilidad Educativa-Unión de Universidades de América Latina y el Caribe (PAME-UDUAL) [6], Programa de Intercambio Universitario-Centro Interuniversitario de Desarrollo (CINDA)[7], Programa Jóvenes de Intercambio México-Argentina (JIMA) [8], Programa de movilidad del Espacio Común de Educación Superior (ECOES) [9], Programa de movilidad de la Asociación de Universidades e Instituciones de Educación Superior (ANUIES) [10], Programa de movilidad estudiantil de la Conferencia de Rectores y Principales de las Universidades de Quebec (CREPUQ) [11], Programa de movilidad estudiantil y académica de La Alianza del Pacífico[12], Programa de movilidad del Consorcio de colaboración de la educación superior en América del Norte (CONAHEC)[13]. Existiendo, además, movilidad interna en la Universidad que permite a los estudiantes el realizar sus estudios en las diversas Unidades [14] (figura 8).

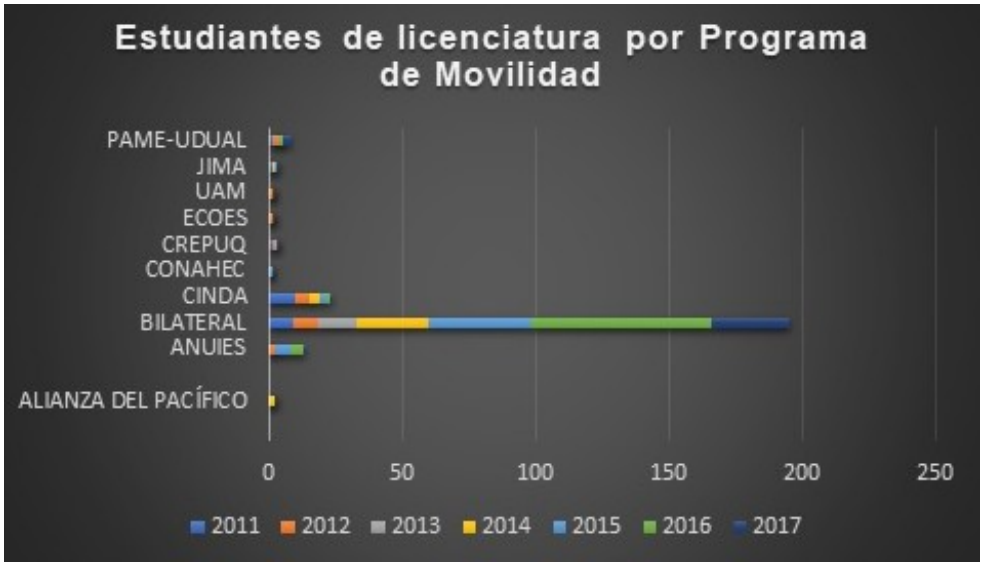


Figura 8. Número de estudiantes de licenciatura que optan por los diferentes Programas de Movilidad.

Todos estos Programas de Movilidad bridan al estudiante la oportunidad de integrarse a la vida universitaria y cultural de otros países fortaleciendo sus capacidades. Además de promover la internacionalización y cooperación de las Instituciones de Educación Superior a través de actividades como el intercambio de publicaciones, movilidad de profesores, desarrollo de investigación y proyectos conjuntos, establecimiento de redes, etcétera. Cabe aclarar que el Programa de Movilidad de ANUIES es una red nacional de intercambio que permite desarrollar y consolidar las relaciones entre universidades dentro del territorio mexicano.

Aunque los estudiantes tienen la opción de seleccionar entre diversos programas de movilidad, es interesante observar que el más utilizado es el Programa Bilateral, por ser un programa establecido entre la Universidad y otras Instituciones de Educación Superior. Implicando trámites mucho más fáciles y no con mucha anticipación, seguido por el Programa CINDA, el Programa ANUIES, y en menor medida los otros programas. Esto se debe a que algunos programas de movilidad tienen requisitos que no todos los estudiantes pueden cumplir en su totalidad por la premura con la que se hay que realizar el proceso.

En 2011 la movilidad de estudiantes de licenciatura fue a países latinoamericanos, España y Canadá; en 2012 a países latinoamericanos, Francia y España; en 2013 a países latinoamericanos, España, Francia, Alemania y Canadá; en 2014 a países latinoamericanos, España, Alemania, Eslovenia, Italia; en 2015 a países latinoamericanos, España, Alemania, Austria y Francia: en 2016 a países latinoamericanos, España, Alemania, Dinamarca, Italia y Eslovenia; en 2017 a países latinoamericanos, España y Francia.

Los estudiantes de posgrado optaron por los siguientes Programas de Movilidad (Figura 9).



Figura 9. Número de estudiantes de posgrado que optan por los diferentes Programas de Movilidad.

En 2011 la movilidad de estudiantes de posgrado fue a Argentina, España y Estados Unidos de Norteamérica; en 2012 a España, Brasil, Chile y Francia; 2013 a Noruega, Chile y Argentina; 2014 a Dinamarca, Cuba, Alemania; 2015 a Costa Rica y Alemania; 2016 a Estados Unidos, España, Bélgica, Dinamarca y Alemania; 2017 a Bélgica, España y Francia.

Según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en 2016, solamente 1% de los mexicanos de entre 25-64 años tienen una maestría, mientras que menos del 1% tiene doctorado [15]. Lo que se ve reflejado en el pequeño número de estudiantes de posgrado que optan por la movilidad educativa en la Institución.

En la figura 10, se muestra la movilidad estudiantil a países latinoamericanos, países de la Unión Europea y Nórdicos, para cuantificar las investigaciones y proyectos conjuntos que tiene la UAM con otras IES.



Figura 10. Mapa de movilidad estudiantil en la Universidad Autónoma Metropolitana

En este mapa se muestra en color amarillo los países angloparlantes; rojo los hispanoparlantes; morado los francoparlantes; naranja los germanoparlantes; café los italoparlantes; azul lenguas nórdicas.

Con la finalidad de establecer cómo impacta esta experiencia en los estudiantes que optaron por el Programa de Movilidad, se realizaron entrevistas. Desde el punto de vista de los estudiantes, aquellos que optan por la movilidad poseen confianza en sí mismos y un deseo de superación. Para lograr un nivel de vida superior a partir de mejores perspectivas de trabajo.

Esta experiencia influye en la formación integral del individuo, a) en el aspecto académico, al responsabilizarse de su propia formación, adaptándose a diversos ambientes educativos con diferentes procesos de enseñanza-aprendizaje que implica tanto el autoaprendizaje como el desarrollo de diversas habilidades (comunicación oral y escrita, trabajo en equipo, socialización, comprensión, etc.) y b) en el aspecto personal, al hacerse cargo de sí mismo, adaptándose a diferentes entornos culturales y sociales, haciendo uso de sus propias capacidades y de un autoconocimiento que le permite explotar sus fortalezas y subsanar sus debilidades.

Resumiendo lo expresado por los estudiantes, esta experiencia de movilidad les permite:

- Decidir el rumbo que toma su vida y afrontar las diversas situaciones que se le presentan.
- Reforzar el autoconocimiento personal, repercutiendo esto en su autoestima, seguridad e independencia.
- Adquirir una madurez e identidad propia, a partir del conocimiento de sus fortalezas y debilidades logrando con ello ser mejores personas.
- Adaptarse a un entorno social con otra forma de pensamiento, a partir del establecimiento de relaciones de respeto y tolerancia.
- Reforzar su formación profesional, al experimentar otro sistema de enseñanza, otros profesores, poniendo en práctica la cooperación y el trabajo en equipo.
- Ampliar la visión que tienen del mundo, al conocer la cultura de otro país.

4. Conclusiones

El Programa de Movilidad Estudiantil para la División de Ciencias Básicas e Ingeniería se incrementó con el paso del tiempo, fortalecido con un mayor número de estudiantes a nivel de licenciatura. La mayoría de los estudiantes optan por irse de movilidad a países latinoamericanos al no dominar otro idioma. Los estudiantes que dominan algún otro idioma optan por irse de movilidad a países de la Unión Europea.

En el caso de los estudiantes de posgrado, eligen para su movilidad países de la Unión Europea, Países Nórdicos y Estados Unidos de Norteamérica. Su cantidad varía poco año con año, pero abren la posibilidad de cooperación e investigación conjunta con otras Instituciones de Educación Superior y Centros de Investigación.

Hay un notable aumento en la movilidad que podría explicarse por el incremento de los estudiantes de nuevo ingreso a la educación superior (32%) que eligieron áreas de estudio relacionadas con la Ciencia y la Tecnología, la Ingeniería y las Matemáticas con miras a acceder a mejores niveles de vida. La movilidad educativa puede elevarse aún más, si se aumenta el gasto público en Educación Pública. Porque según la Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) en 2017 el gasto del país por estudiante era de 3,703 dólares, de los más bajos en comparación con el promedio de sus países miembros con un gasto de 10,759 dólares.

La movilidad educativa y académica en la División de Ciencias Básicas e Ingeniería, representa la posibilidad de desarrollar investigación de mayor envergadura dentro del ámbito científico al establecer redes con proyectos conjuntos.

La movilidad además de proporcionar al estudiante el vivir la vida universitaria en otro país, le permite tener una experiencia única al enfrentar los retos y desarrollar sus habilidades y capacidades. Los estudiantes que realizan el intercambio conocen y aprenden otras culturas. Lo que les permite crecer como resultado de una experiencia gratificante y enriquecedora tanto en su vida personal como profesional. Además, les proporciona la oportunidad de valorar lo que tienen en su país y a vislumbrar la potencialidad tanto de su nación como el de otros países.

Por la importancia de los Programas de Movilidad, la UAM ha incluido esta modalidad en algunos de sus Planes de Estudio para incentivar al estudiante a realizar estas estancias académicas.

5. Referencias Bibliográficas

[1] Conferencia Mundial sobre la Educación Superior (1998), *Declaración Mundial sobre la Educación Superior en el siglo XXI: visión y acción y Marco de acción prioritaria para el cambio y el desarrollo de la educación superior*, París, UNESCO, en: http://www.unesco.org/education/educprog/wche/declaration_spa.html.

[2] ANUIES (1999). *La educación superior en el siglo XXI. Líneas estratégicas de desarrollo. Una propuesta de la ANUIES,* en publicaciones.anuies.mx/pdfs/revista/Revista113_S5A2ES/pdf

[3] Malo, Salvador (2000), La educación superior en el siglo XXI. Líneas estratégicas de desarrollo. Una propuesta de la ANUIES*, Revista de la Educación Superior*, vol. 29, núm. 113.

[4] UNESCO (2005), *Hacia las sociedades del conocimiento.* UNESCO.

[5] UAM- Colegio Académico (2007), *Reforma al Reglamento de Estudios Superiores, así como adiciones a las Políticas Generales,* Sesión 296, México, UAM.

[6] Unión de Universidades de América Latina y el Caribe (2006), "Programa académico de Movilidad Educativa-Unión de Universidades de América Latina y el Caribe", en: http://pame.udual.org/acerca.html

[7] Centro Interuniversitario de Desarrollo (1971), "Programa de Intercambio Universitario", en: http://www.cinda.cl/programa de movilidad/

[8] ANUIES-CIN (2005), "Programa Jóvenes de Intercambio México-Argentina". http:www.jima.anuies.mx

[9] Espacio Común de Educación Superior (2004), "Programa de movilidad estudiantil nacional, en http://www.ecoes.unam.mx

[10] ANUIES (1950), Programa de Movilidad Nacional, en

http://www.anuies.mx/programas

[11] Conférence des Recteurs et des Principaux des Universités Du Québec (1963), "La movilité des étudiants", en http://es.april.international.com, http://www.crepuq.qc.ca/

[12] Alianza del Pacífico (2012), Programa de movilidad estudiantil y académica, en: http://alianzapacifico.net/becas/

[13] Consorcio para la Colaboración de la Educación Superior en América del Norte (1994), programa de movilidad estudiantil, en https://www.conahec.org/node/762

[14]Movilidad Educativa en la UAM. Disponible en http://www.becas.uam.mx/17/convocatoria.html

[15] Organización para la Cooperación y Desarrollo Económicos (OCDE) (2017), Panorama de la Educación, en https://imco.org.mx/educacion/panorama-la-educacion-2017-via-ocde/

Preconceptos y pensamiento abstracto en alumnos de primer ingreso a la Universidad

Bastién, M. G. M.[1], Cruz, F.[2], Pérez, R.A.R.[3]

Universidad Autónoma Metropolitana Azcapotzalco

[1,2,3] mbastien, fcruz, pra @azc.uam.mx

1. Resumen.

Presentamos una revisión de los preconceptos asociados a la fuerza gravitacional que estudiamos en 110 alumnos de las carreras de ingeniería, en particular los de la atracción terrestre. La metodología se basó en un test con comentarios escritos de las respuestas, llamado de doble entrada. Los resultados muestran que al igual que en secundaria y bachillerato el estudiante tiene varios preconceptos erróneos que le impiden una correcta comprensión de la ley de atracción gravitacional, a pesar de esto el énfasis de los docentes recae en la parte matemática dando por hecho una comprensión conceptual que no tienen los alumnos. El análisis muestra que además de confirmar los preconceptos encontrados en otros estudios, alrededor del 10% de alumnos muestran un razonamiento que refleja un estadio de operaciones concretas -en la clasificación de Piaget- que no les permite realizar razonamientos abstractos. Es importante reconocer que en la Universidad se encuentren estudiantes en esta etapa del desarrollo cognitivo.

Palabras clave: Atracción gravitacional, error conceptual, pensamiento concreto.

2. Introducción

En la población de alumnos de las 10 licenciaturas en ingeniería que se imparten en la Universidad Autónoma Metropolitana- Azcapotzalco se tienen un alto grado de deserción en los primeros trimestres y casi el 50% de la población se encuentra cursando alguno de los primeros 4 trimestres de Ingeniería. Los elevados índices de reprobación muestran, entre otras cosas, que los alumnos no dominan los contenidos. Es necesario conocer lo que ocurre específicamente con nuestros alumnos de primer ingreso respecto al conocimiento de la atracción gravitacional para tomar las medidas pertinentes, pues son conocimientos que se emplean constantemente en los cursos de física a lo largo de los primeros 4 trimestres.

Una de las deficiencias observadas por varios docentes en el marco de las reuniones de profesores de física, es que los alumnos no realizan correctamente los diagramas de cuerpo libre (DCL), una falla común es la de que faltan fuerzas o se omite la fuerza gravitacional lo que trae como consecuencia una aplicación errónea de la segunda ley de Newton. Son varios los autores que han estudiado la falta de comprensión y preconceptos asociados a la fuerza gravitacional (FG) desde la primaria [1, 2] al bachillerato [3, 4] los conceptos alternativos que encontramos en este trabajo son consistentes con los de estos autores, salvo que en nuestro caso se trata de estudiantes de primer ingreso a la Universidad. Otros estudios que se han realizado con alumnos de primer ingreso a la universidad no han sido tan específicos [5] y reportan problemas con la comprensión conceptual, de la física elemental.

En este trabajo presentamos los preconceptos que determinamos en los alumnos sobre este tema. Parecería que los preconceptos en el nivel universitario son escasos, pero la investigación muestra que no es así; además vamos a mostrar que algunos de ellos están relacionados con la falta de madurez cognitiva que ya deberían tener en el nivel superior [6].

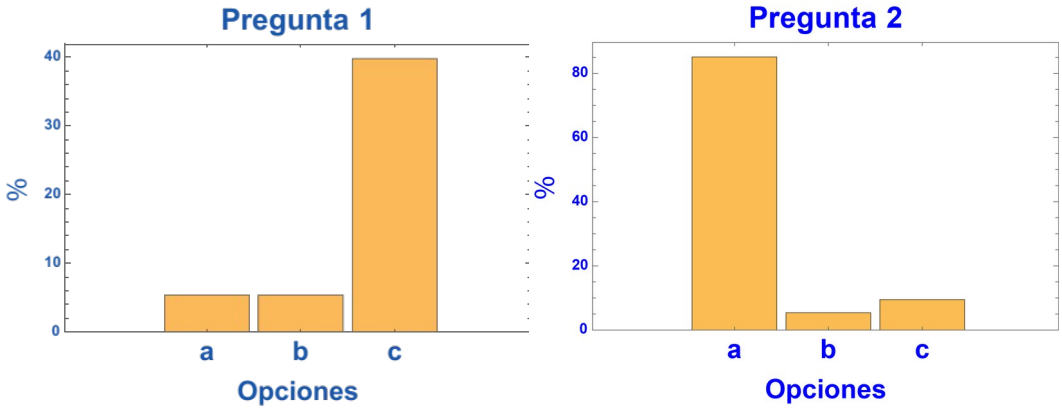
3. Metodología

Aplicamos un cuestionario exploratorio de 10 preguntas a los alumnos de los dos grupos al inicio del trimestre 18-I, más adelante afinamos el cuestionario y lo aplicamos a seis grupos, todos de primer ingreso durante el trimestre 18-O. El test se aplicó en la primera semana de clases. El cuestionario es de opción múltiple y se les solicita una explicación escrita justificando su respuesta. Las preguntas fueron seleccionadas a partir del cuestionario exploratorio y de la experiencia previa de los autores con otros grupos universitarios. Este cuestionario se presenta en el anexo.

En total se aplicaron 110 cuestionarios a estudiantes que provienen principalmente del Colegio de Bachilleres, Escuelas Preparatorias Oficiales del Estado de México y Escuelas Preparatorias privadas de la Cd. de México.

4. Resultados y discusión

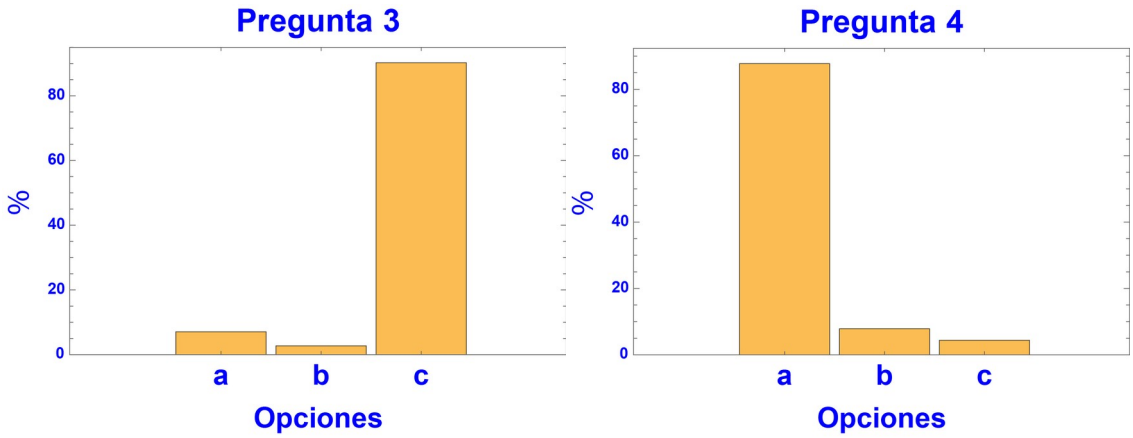
En las siguientes figuras se han agrupado los resultados de las preguntas. En este estudio tuvimos presente la falta de comprensión del enunciado de las preguntas, que se refleja cuando se dan justificaciones erróneas. Este fue un efecto que consideramos a partir de un análisis de las respuestas, concluimos que ocurrió en muy pocos casos, que fueron eliminados de la estadística. La mayoría de los estudiantes comprendió las preguntas. Las respuestas y sus justificaciones son congruentes entre sí.



Por ejemplo, en la pregunta 1 acerca del valor de la aceleración de la gravedad, la respuesta correcta es “b” (Varía con el valor de la posición geográfica) y como observamos la respuesta más seleccionada fue la “c” que es constante y que su valor es 9.81 m/s^2 lo que nos indica la fuerte dependencia de, por un lado, los textos extranjeros que indican el valor más aceptado en su país y, por otro lado, la creencia en las “constantes” como pi o *e*.

La pregunta 2 sobre la causa de la aceleración terrestre, la mayoría de los alumnos tienen clara la causa en la atracción gravitacional y solamente 8 alumnos (aprox. 9%) asignan la causa al propio objeto, lo que es de llamar la atención y se refiere a un preconcepto poco explorado sobre la idea de que en los objetos se comportan así. Es un preconcepto que deja a un lado las causas y postula simplemente que “así ocurre” lo que indica un pensamiento concreto [7] temprano que no busca causas profundas sino trata de explicar los fenómenos con los hechos observables directamente sin análisis. Esto se refuerza con la respuesta a la pregunta 9 sobre la causa del peso en la superficie terrestre, en la que un 12% (13 alumnos) contesta que se debe a que “todos los

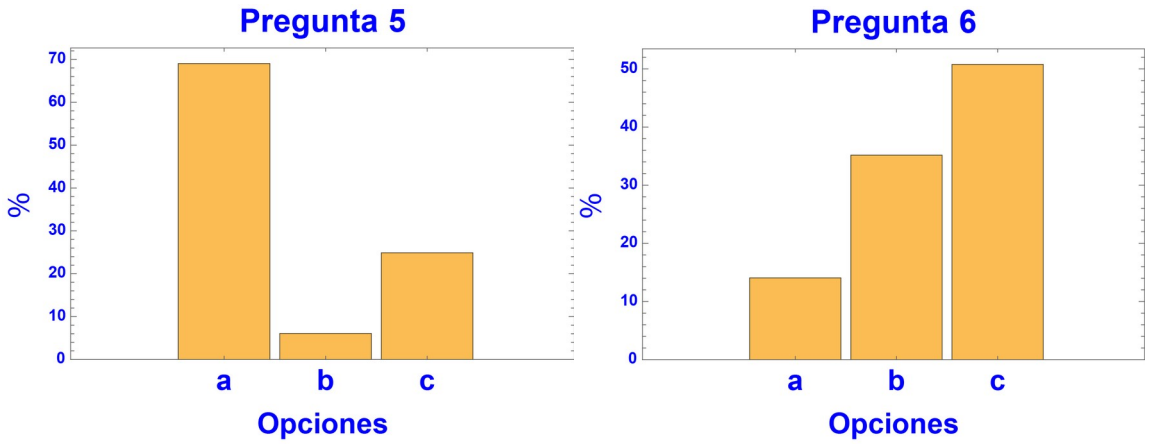
cuerpos tienden a caer con una cierta fuerza", es decir no hay un análisis de las causas, simplemente es "como como ocurre", lo que se observa es lo que se enuncia, no hay explicación más profunda del hecho.



Las preguntas 3 y 4 son sobre la dirección de la fuerza gravitacional y sobre todo deseábamos conocer si había alumnos que modificaran la dirección de la fuerza gravitacional de acuerdo con la dirección del movimiento del objeto (cae o sube) la gran mayoría de los alumnos, el 85%, no modifica la dirección hacia abajo (hacia el centro de la Tierra) de la fuerza de atracción gravitacional, pero hay un 15% de alumnos que responden que la dirección de la fuerza de atracción depende del movimiento del objeto o que la dirección es hacia arriba. Esto porcentaje es pequeño, pero nuevamente indicativo de que tenemos en nuestros alumnos diferentes niveles de desarrollo cognitivo[8]; de acuerdo con Piaget [9] nuestros alumnos ya deberían tener un nivel formal de pensamiento, es decir hipotético-deductivo, pero encontramos que no es así y además en concordancia con otros trabajos que muestran que entre los alumnos de primer ingreso a la Universidad se encuentran alumnos con pensamiento concreto que no están preparados para realizar razonamientos que requieren abstracción y comprender conceptos que no se pueden ejemplificar experimentalmente [10]. Un alumno con nivel cognitivo en la etapa de pensamiento concreto requiere ejemplos experimentales en lo conceptual, y en la resolución de problemas, ejemplos "numéricos" no con "letras". Son alumnos que fácilmente detectamos en el salón de clase y que requieren un poco más de atención debido a su bajo nivel de abstracción.

En la pregunta 5 acerca de la fuerza que actúa en el punto más alto de un lanzamiento vertical, las respuestas fueron las esperadas, dado que no hay velocidad, se supone (erróneamente) que no habría fuerza y sin embargo el 68% de los alumnos indicó que actuaba la fuerza gravitacional, un pequeño ´porcentaje se decantó por la respuesta de que la fuerza gravitacional no

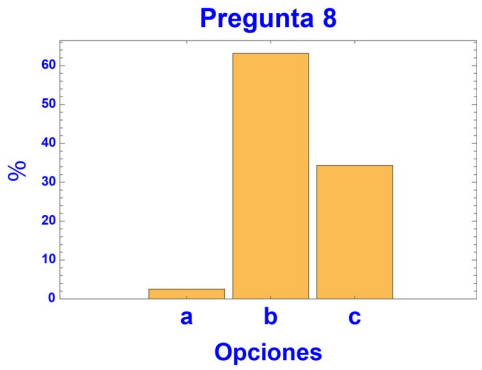
actúa en ese momento, lo interesante es que un 25% de los alumnos, 27 alumnos responden que en ese momento no actúa ninguna fuerza. Aquí se tiene una explicación de orden general que se refiere a un modelo alterno de pensamiento [11] en que se postula que los preconceptos y dificultades del estudiante en torno a este tema, están contextualizados en una teoría que, entre otras cosas, asigna un "depósito" de fuerza en el objeto que se lanza hacia arriba y funciona como una especie de combustible que se agota y es entonces que se alcanza la altura máxima. La situación que nos interesa resaltar en este trabajo es el razonamiento de "así ocurre" y no hay más que explicar. Razonamiento como ya vimos ligado a un tipo de pensamiento concreto. Es muy interesante una de las justificaciones que se dan a esta respuesta, un alumno escribió "es una consecuencia de lanzar algo hacia arriba" es decir ¡Así es y no requiere explicación! Así ocurren las cosas. Este es el tipo de razonamiento que debe hacer que un docente comprenda que está frente a alumnos con un nivel bajo de desarrollo cognitivo.



La pregunta 6 confirma el preconcepto de que a grandes alturas la fuerza gravitacional deja de existir, la respuesta a) *no tiene peso* significa la asignación del "peso" al objeto mismo, lo que también se observa en la pregunta 2, cuando los alumnos responden que *el peso tiene su origen en el objeto.* En este caso es más claro este razonamiento, porque el 14% (13 alumnos) asocian el peso al objeto.

Recordemos el modo de expresión "un ladrillo pesa más que un papel" refleja el hecho de que el peso lo "tiene" el objeto y no se debe a una fuerza externa. Exactamente este es el sentido de la respuesta a) en la pregunta 7 en la que, al preguntar sobre la causa de la ascensión de un buzo dentro del agua, la respuesta de 8 alumnos (9%) es que la fuerza gravitacional no afecta al buzo. Esto nuevamente nos indica que algunos alumnos presentan un nivel cognitivo concreto donde el peso reside en el objeto y a mayor tamaño, mayor peso, y en algunas otras situaciones, como la del buzo, la fuerza gravitacional no tiene efecto, por razones desconocidas, sobre un objeto. Esto se confirma con las respuestas a la pregunta 10 en la que se pregunta sobre la fuerza gravitacional a 5 km de altura, la respuesta mayoritaria (83%) es "la misma que en la superficie terrestre", pero 17%

(19 alumnos) responden que es mucho menor que en la superficie terrestre. Es una confirmación de que para un subgrupo de alumnos la gravedad se “extingue” poco a poco hasta llegar a la altura de una estación espacial que orbite la Tierra. No encontramos en las justificaciones escritas libremente alguna que hable de un “límite” a la actuación de la fuerza gravitacional, al parecer hay un salto cualitativo de la fuerza que se ejerce al nivel de la superficie terrestre a la ausencia de ella en el “espacio exterior” aunque cabe decir que no existe tampoco una definición clara de lo que significa “espacio exterior” o a cuantos kilómetros se encuentra. Nuevamente es una situación que resulta de la falta de un razonamiento formal, pues como afirma Piaget en *The growth of logical thinking from childhood to adolescence*[12] “…la característica más prominente del pensamiento formal es que ya no trata más con objetos directamente, sino con elementos verbales…” y este es el modo preferido de enseñanza de la física en clase teórica, el razonamiento verbal, por lo que es clara la importancia de que algunos alumnos no hayan desarrollado este tipo de razonamiento abstracto.



La pregunta 8 es acerca de la razón de que un globo lleno de helio, ascienda. Las opciones de respuesta son:

a) Sobre él no actúa la fuerza gravitacional.

b) El gas dentro del globo lo tiende a llevar hacia arriba.

c) La fuerza de flotación sobre el globo es mayor que la fuerza gravitacional.

Como se observa la respuesta seleccionada en un 64% es la b) que no explica nada, simplemente “así ocurren las cosas”, es decir vemos un razonamiento de tipo concreto que no va más allá de lo que el estudiante observa. Este es un preconcepto que muestran muchos de los estudiantes de bachillerato, pues no alcanzan a comprender el proceso de flotación más que en términos de una explicación directa, lo que es indicativo de un pensamiento concreto; en este caso el razonamiento está presente en la Universidad y es el responsable de la falta de comprensión de algunos alumnos.

5. Conclusiones

Encontramos que los alumnos de primer ingreso tienen varios preconceptos que ya han sido reportados en la literatura para otros países. Más importante es el hecho de que el nivel cognitivo de un subgrupo de ellos -de acuerdo con la clasificación de Piaget e Inhelder del desarrollo cognitivo- se encuentre en un estadio menor al que se espera, pues ya son adolescentes y deberían estar en la última etapa de desarrollo, la etapa de pensamiento formal, es decir no cuentan con la estructura cognitiva para la comprensión de conceptos abstractos o que se basen en "experimentos pensados" que la mayoría de profesores utiliza para discutir lo que ocurre con la fuerza de atracción gravitacional, incluso un método muy utilizado es hacer referencia a la ecuación del campo y de aquí postular varios resultados que se desprenden del análisis algebraico, pero por mejor planteada que esté la explicación un cierto número de alumnos no logrará la comprensión. Señalemos que esta es la razón de que después de que los alumnos sigan un curso donde se discuten este y otros preconceptos, algunos no logran comprender el fenómeno y durante un tiempo continúan con preconceptos en el tema.

Un docente debe tener cuidado con este tipo de alumnos, sobretodo porque muchos no esperan que la falta de comprensión provenga de una falta de madurez y no conciben que una explicación aparentemente sencilla, sin complicaciones, sobre la fuerza de atracción no aclare los conceptos en los alumnos, esta situación es delicada en el aula. Las repercusiones para otros aspectos académicos son importantes pues incluso en la resolución de problemas[13] uno de los puntos en que más errores se cometen es en la parametrización, es decir en la asignación de variables matemáticas a las magnitudes físicas, pues si no se comprende una magnitud física, no es posible asignarle una variable matemática; lo mismo ocurre cuando el alumno busca la "fórmula" que resuelve el problema, pues se trata de una entidad concreta, en cambio el razonamiento con varias ecuaciones es un camino mucho más abstracto. Los docentes deben estar al tanto de esta falta de madurez cognitiva, porque al menos, un pequeño subgrupo de los alumnos de primer ingreso se encuentra en esta situación, aunque esto no significa que el resto no tenga problemas, por ejemplo, en este estudio, tan sólo 5 alumnos, contestaron correctamente todo el cuestionario, lo que es un porcentaje muy bajo (5%) para conocimientos que se imparten uno o tres años antes de ingresar a la Universidad. Una buena utilización de este trabajo implica compartir estos hallazgos desde espacios académicos para mejorar el desempeño de nuestros estudiantes. Finalmente, a partir de los preconceptos determinados observaremos su evolución después de una instrucción activa que será planteada en un siguiente trabajo.

6. Bibliografía

1. Lelliot, A. (2014). Understanding Gravity: The Role of a School Visit to a Science Centre, International Journal of Science Education, Part B, 4:4, 305-322.
2. Pablico, R., J. (2010). Misconceptions on force and gravity among high school students. *LSU master's* Theses.2462. https://digitalcommons.lsu.edu/ gradschool_theses/2462
3. Palmer, D. (2001). Students' alternative conceptions and scientifically acceptable conceptions about gravity. *International Journal of Science Education,* 23(7), 691–706.
4. Reynoso, E., Fierro, E., Torres, G., Vicentini-Missoni, M., Perez de Celis, J. (1993). The alternative frameworks presented by Mexican students and teachers concerning the free fall of bodies. *International Journal of Science Education,* 15(2), 127–138.
5. Halloun, I. and Hestenes, D. (1985). The initial state of college physics students. *American Journal of Physics,* 53, 1043-1055.
6. Piaget, J., Inhelder B. (1959). The growth of logical thinking from childhood to adolescence. *Basic Books inc*. 2nd ed. USA.
7. Piaget, J., Inhelder B. *Op. Cit.*
8. McKinnon, J. W., Renner, J. W.(1971). Are colleges concerned with intellectual development, *American Journal of Physics*, 39, 1047-1052.
9. Piaget, J., Inhelder B. *Op. Cit.*
10. Piaget, J., Inhelder B. *Op. Cit.*
11. Viennot, L. (1979). Le raisonnement spontané en dynamique élémentaire. *Hermann*, Paris.
12. Piaget, J., Inhelder B. *Op. Cit*
13. Bastién, M., G., Mora, C., Sánchez, G., D. (2010). Obstáculos en la resolución de problemas en alumnos de bajo rendimiento. *Lat. Am. J. Of Phys. Educ.* 4(3). 677-682.

Anexo

7. Cuestionario

*Nombre*_____

1. ¿Cuál afirmación es correcta sobre la magnitud de la aceleración gravitacional "g" cerca de la superficie terrestre?

a) Es constante y su valor es 9.80 m/s^2
b) Varía con la posición geográfica.
c) Es constante y su valor es 9.81 m/s2.

Explica brevemente por favor _____

2.- ¿Cuál es la causa de la aceleración gravitacional sobre un objeto?

a) Es una consecuencia de la fuerza de atracción gravitacional entre el objeto y la Tierra.
b) Todos los cuerpos tienden a caer hacia abajo.

c) La aceleración gravitacional la produce el propio cuerpo con su masa.
Explica brevemente por favor _____

3. Cuando un objeto se lanza hacia arriba en la superficie terrestre ¿Cuál es la dirección de la fuerza gravitacional?

a) Depende del movimiento del objeto, si sube, la fuerza apunta hacia arriba.
b) Siempre apunta hacia arriba, no depende de que el cuerpo suba o baje.
c) La fuerza gravitacional siempre se dirige hacia abajo.
Explica brevemente por favor _____

4.- Cuando un objeto cae ¿Cuál es la dirección de la fuerza gravitacional?

a) La fuerza gravitacional siempre se dirige hacia abajo.

b) Depende del movimiento del objeto, si baja, la fuerza apunta hacia abajo.

c) Siempre apunta hacia arriba, no depende de que el cuerpo suba o baje.

Explica brevemente por favor _____

5.- Cuando un objeto se lanza hacia arriba y alcanza su altura máxima, no tiene velocidad ni hacia arriba ni hacia abajo, en ese momento:

a) La fuerza gravitacional actúa sobre el objeto hacia abajo.

b) En ese instante la fuerza gravitacional no actúa.

c) En ese instante no actúa ninguna fuerza sobre el objeto.

Explica brevemente por favor _____

6.- En la estación espacial que orbita a la Tierra los astronautas "flotan". ¿ Por qué ocurre esto?

a) No tienen peso y por ello no son atraídos por la Tierra.

b) Debido a la fuerza gravitacional están en una caída continua y por ello parece que flotan.

c) La fuerza gravitacional es cero a esa distancia de la Tierra y por ello no tienen peso.

Explica brevemente por favor _____

7.- ¿Cuál afirmación es correcta para un buzo que asciende dentro del mar?

a) La fuerza gravitacional no afecta a un buzo dentro del agua.

b) La fuerza gravitacional es menor que la fuerza de flotación en el buzo.

c) La fuerza gravitacional no actúa bajo la superficie del mar.

Explica brevemente por favor _____

8.- ¿**Cuál afirmación es correcta para un globo lleno de helio que está ascendiendo?**

a) Sobre él no actúa la fuerza gravitacional.

b) El gas dentro del globo lo tiende a llevar hacia arriba.

c) La fuerza de flotación sobre el globo es mayor que la fuerza gravitacional.

Explica brevemente por favor _____

9.- El peso de un objeto en la superficie terrestre se debe a:

a) La masa del propio cuerpo produce el peso.

b) La fuerza gravitacional entre la Tierra y el objeto.

c) Todos los objetos tienden a caer hacia abajo con una determinada fuerza.

Explica brevemente por favor _____

10.- De un avión que vuela a 5 km de altura se deja caer un paquete, podemos decir que sobre el paquete:

a) la fuerza gravitacional es mucho mayor que en la superficie terrestre.

b) La fuerza gravitacional es mucho menor que en la superficie terrestre.

c) La fuerza gravitacional es la misma que en la superficie terrestre.

Explica brevemente por favor _____

Simulación de un sistema de medición electrónico didáctico basado en demodulación síncrona para determinar la impedancia eléctrica de un circuito reactivo pasivo

Guadarrama Santana Asur[1], Martínez Gutiérrez Daniel[2], Uc Martín Jorge[1]

[1] Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología UNAM.

[2] Facultad de Ingeniería UNAM.

asur.guadarrama@icat.unam.mx, dmartinezg73@gmail.com, allstar_ghost@icloud.com

1. Resumen

En este trabajo se describe el circuito electrónico de un sistema de medición de voltaje de dos canales con el fin de determinar la impedancia eléctrica de un circuito eléctrico RC en paralelo, entendiendo su funcionamiento a nivel de bloques con el análisis de las señales eléctricas que entran y salen en cada una de las etapas que conforman el sistema. El sistema propuesto está basado en la técnica de demodulación síncrona de señales que generalmente se aplica a los sistemas de comunicaciones. Sin embargo, esta técnica también es la base de la detección sensible a la fase muy utilizada en los sistemas de instrumentación de bajo ruido. Las respectivas componentes real *R* y capacitiva *C* del circuito RC se calcularon en función de los voltajes de salida obtenidos de las simulaciones. Se obtuvieron los valores de impedancia y se compararon con resultados calculados teóricamente aplicando los conceptos involucrados que definen a la impedancia eléctrica de un circuito eléctrico resistivo-capacitivo en paralelo y con mediciones experimentales realizadas con un medidor LCR comercial. Los resultados mostraron un error menor al 5% validando así la utilización didáctica del sistema simulado para la enseñanza de impedancia eléctrica.

2. Introducción

La técnica de modulación y demodulación síncrona de señales generalmente se aplica a los sistemas de comunicaciones sin embargo esta técnica también es la base de la detección sensible a la fase muy utilizada en los sistemas de instrumentación de bajo ruido. En general, cualquier demodulador síncrono es un multiplicador que extrae la suma y la diferencia de la frecuencia de la señal de entrada y una frecuencia de referencia. De esta forma, es posible obtener el doble de la información montada en una portadora simplemente teniendo un término en fase y otro en cuadratura. Si se utilizan un par de demoduladores síncronos se puede extraer la amplitud y la fase de una señal compleja al mismo tiempo. Ciertos tipos de demoduladores síncronos o detectores sensibles a la fase son conocidos como amplificadores lock-in. Estos pueden formar un filtro paso banda que automáticamente se centra en la frecuencia de interés, y puede permitir altísimas mejoras en la relación de señal a ruido [1]. También se puede aplicar la técnica de demodulación síncrona en un sistema de instrumentación para determinar la impedancia eléctrica de un circuito reactivo pasivo [2].

Generalmente el concepto de impedancia eléctrica se enseña de una forma teórica en clases de circuitos eléctricos y de una forma experimental en laboratorios con equipos electrónicos de medición comerciales. Sin embargo, la utilización de los conceptos teóricos involucrados con la impedancia muchas veces no es muy claro en aplicaciones prácticas, como es el caso de la instrumentación electrónica. Por ejemplo, cuando se utilizan sensores de reactancia fija o variable es necesario implementar una etapa de acondicionamiento electrónico que forme parte de un sistema de medición para detectar cambios de alguna variable física, química o biológica que provoque un cambio proporcional en la impedancia del sensor. Para mostrar estos conceptos teóricos de una forma didáctica es necesario realizar mediciones experimentales en laboratorio utilizando sensores, electrónica de acondicionamiento e instrumentos de medición comerciales, cuando se cuenta con los recursos necesarios [2]. Otra forma práctica para enseñar estos conceptos teóricos es por medio de simulaciones en computadora que también es un recurso didáctico muy utilizado y versátil.

El objetivo de este trabajo es aplicar los conceptos teóricos que involucran la impedancia eléctrica por medio de simulaciones de un circuito electrónico de un sistema de medición de voltaje de dos canales con el fin de determinar la impedancia eléctrica de un circuito reactivo, entendiendo su funcionamiento a nivel de bloques con el análisis de las señales eléctricas que entran y salen en cada una de las etapas que conforman el sistema. Así como comprobar los resultados obtenidos, de las simulaciones de sus respectivas componentes real *R* y capacitiva *C* en función de los voltajes de salida, con resultados ideales calculados teóricamente y experimentales aplicando los conceptos involucrados que definen a la impedancia eléctrica de un circuito eléctrico resistivo-capacitivo en paralelo.

3. Condiciones experimentales

Se propone un sistema de medición de voltaje (SMV) de dos canales para determinar la impedancia de un circuito RC en paralelo. El sistema se conforma por una fuente de voltaje alterno, un circuito RC en paralelo, una etapa de amplificación, dos etapas de demodulación síncrona (en fase y cuadratura), y dos etapas de filtrado, una para cada canal de salida. Cada etapa de salida se representa matemáticamente por su respectiva función de transferencia para así obtener las componentes de voltaje en fase y en cuadratura, correspondientes a cada canal de salida del sistema. Estos voltajes se sustituyen en las expresiones de función de transferencia resultantes para cada canal con el fin de calcular los valores de la resistencia *R* y del capacitor *C* y finalmente, con estos, obtener el valor de la impedancia *Z* [2]. En forma general el sistema de medición de voltaje (SMV) de dos canales propuesto se representa en el siguiente diagrama de bloques, figura 1.

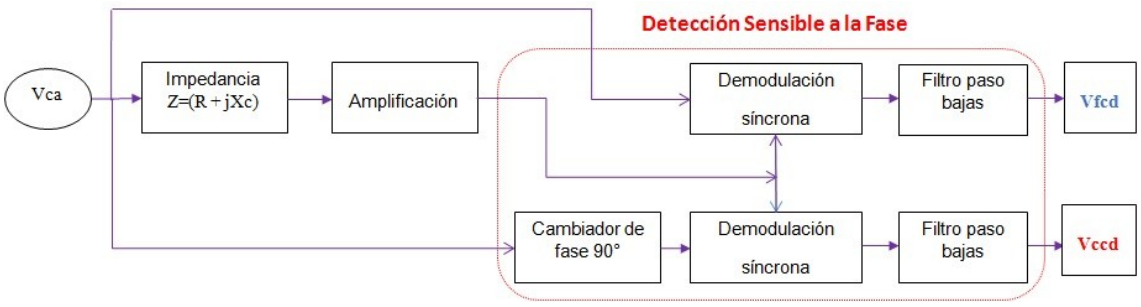


Figura 1. Diagrama de bloques general del SMV básico de dos canales.

Como se puede observar el SMV está formado por una fuente de voltaje de corriente alterna V_{ca}, una impedancia *Z* formada por un circuito *RC*, una etapa de amplificación, una etapa de detección sensible a la fase DSF y la salida de dos canales en los cuales se obtienen dos voltajes de corriente directa, uno en fase y otro en cuadratura o con desfasamiento de 90º. La etapa de DSF está conformada por una etapa de desfasamiento de 90º, dos etapas de demodulación síncrona DMS y dos etapas de filtrado paso bajo FPB, una para cada canal [2].

3.1 Amplificación

El circuito eléctrico RC en paralelo se alimenta por un voltaje de corriente alterna senoidal $V_{es} = Asen\omega t$, en donde la amplitud $A = 1V_P$ y la frecuencia $f = 1KHz$. La salida de voltaje V_S del circuito RC se encuentra acoplada a dos etapas de amplificación A y B, como se muestra en la figura 2.

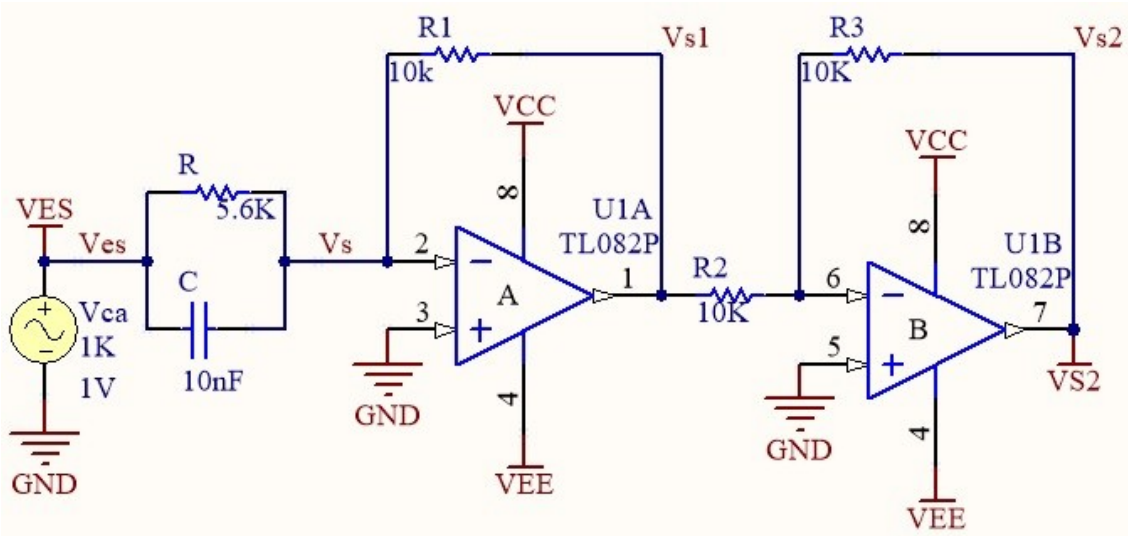


Figura 2. Circuito RC en paralelo acoplado a dos etapas de amplificación A y B.

Realizando un análisis de corrientes en los nodos de las entradas de las etapas de amplificación A y B se obtiene el voltaje de salida $V_{S2} = G_1G_2Asen\omega t$ en función de las ganancias G_1 y G_2 de los amplificadores U1A y UB1, de los voltajes de entrada y salida V_{es}, V_S y V_{S1} y de las componentes resistiva R y reactiva $X_C = 1/\omega C$ del circuito RC con la siguiente expresión,

$$V_{s2} = V_{es}\left(\frac{R_1}{R} + \frac{R_1}{\frac{1}{\omega C}}\right). \quad (1)$$

Así la señal $V_{S2} = G_1G_2Asen\omega t$ estará desfasada por un ángulo θ con respecto de la señal V_{es} de entrada al circuito RC debido solamente a la componente reactiva X_C en donde,

$$\theta = \tan^{-1}\omega RC\ . \quad (2)$$

Se puede despejar de forma independiente las variables de R y C en función de sus componentes resistiva y reactiva respectivamente de la ecuación (1), así para obtener el valor de R se tiene que,

$$R = R_1\left(\frac{V_{es}}{V_{s2}}\right). \quad (3)$$

Y para obtener el valor de C se tiene que,

$$C = \frac{1}{\omega R_1 \left(\frac{V_{es}}{V_{s2}} \right)} . \tag{4}$$

Realizando simulaciones del circuito de amplificación se obtienen las señales de voltajes de entrada V_{es} y salida V_{S1} y V_{S2} de cada etapa de amplificación en donde se puede observar el desfasamiento presente entre estas, como se muestra en la figura 3.

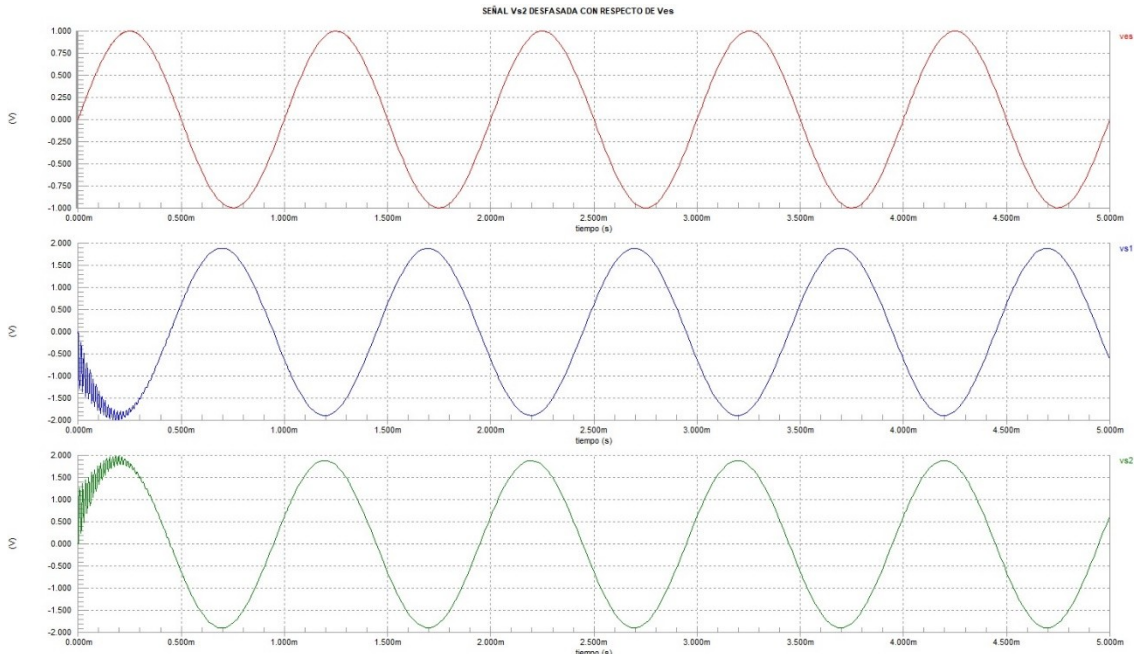
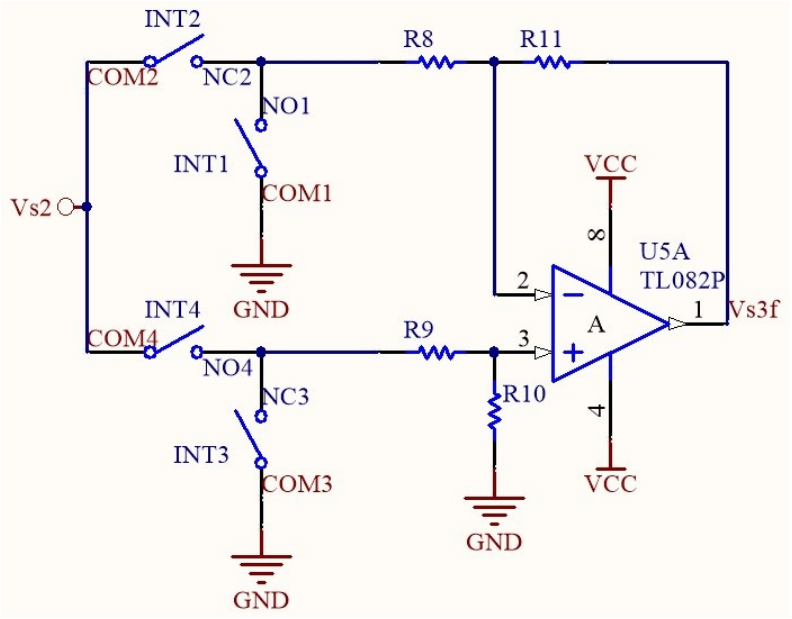


Figura 3. Señal de voltaje de entrada al circuito RC V_{es} (arriba), señales de voltaje de salida de cada etapa de amplificación V_{S1} (en medio) y V_{S2} (abajo), desfasadas con respecto a V_{es}.

La señal de voltaje V_{S2} entra simultáneamente a dos etapas de demodulación síncrona, una sin desfasamiento y otra en cuadratura para así obtener los voltajes de salida en fase y en cuadratura con respecto de V_{es}.

3.2 Demodulación síncrona en fase

El voltaje senoidal V_{es} entra a un circuito comparador U3A del cual se obtiene una señal cuadrada de sincronía V_{sif} en fase y con la misma frecuencia de V_{es}, utilizada para sincronizar una etapa de amplificación diferencial conmutada y controlada por interruptores analógicos. En este caso se utilizan dos pares de interruptores analógicos (NC y NO) integrados en el circuito MAX4603 (U4 y U6), estos permiten simplificar las



etapas de sincronización de los demoduladores. Los dispositivos electrónicos mencionados en conjunto forman la etapa de demodulación síncrona [1], figura 4.

Las secuencias lógicas de cerrado (1) y abierto (0) de los interruptores analógicos INT así como la ganancia diferencial G_D de salida para cada función conmutada del amplificador diferencial, no inversora (NINV) e inversora (INV), se muestran en la tabla 1.

Figura 4. Demodulador síncrono basado en un amplificador diferencial conmutado.

Tabla 1. Secuencia de conmutación de los interruptores analógicos para el funcionamiento del demodulador síncrono basado en un amplificador diferencial conmutado.

Función	INT1	INT2	INT3	INT4	G_D
NINV	0	1	1	0	1
INV	1	0	0	1	-1

De esta forma la señal de salida del demodulador síncrono en fase V_{s3f} queda expresada de la siguiente manera con un ángulo en fase, $\Phi = 0°$, con respecto al voltaje de entrada V_{es}.

$$G_D V_{s3f} = \begin{Bmatrix} V_{s2} = G_1 G_2 A sen(\omega t + \varnothing) & 0 < \omega t < \pi \\ -V_{s2} = -G_1 G_2 A sen(\omega t + \varnothing) & \pi < \omega t < 2\pi \end{Bmatrix} . \quad (5)$$

La señal de voltaje V_{S2} pasa por una primera etapa de demodulación síncrona en fase obtenida con una señal cuadrada de sincronía V_{sif} con la misma fase y frecuencia que V_{es}, con el fin de controlar la secuencia de conmutación del amplificador diferencial para obtener las ganancias unitarias no inversora e inversora como se expresó en la tabla 1. Con estas condiciones la ecuación (5) muestra que para una señal senoidal el voltaje de salida V_{s3f} se comportará como una señal rectificada. Esta etapa de demodulación síncrona forma parte del DSF sin desfasamiento, como se muestra en la figura 5.

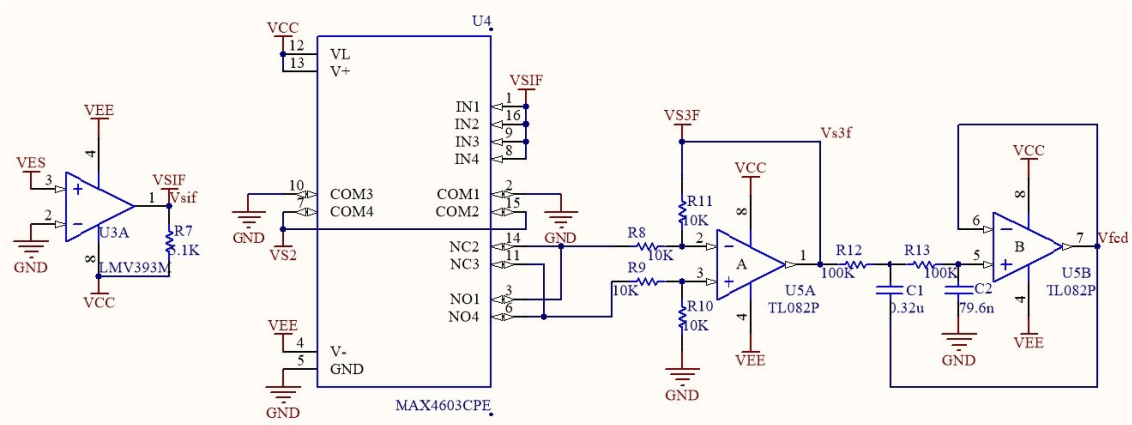


Figura 5. Circuito de detección sensible a la fase (DSF) basado en demodulación síncrona en fase.

Para comprobar que la primera etapa de demodulación síncrona funciona correctamente se realizan simulaciones sustituyendo la señal de voltaje senoidal V_{es} en lugar de la señal de voltaje V_{S2}, señal de voltaje de salida de la etapa de amplificación, en las entradas COM4 y COM2 del circuito integrado U4. Las señales V_{es}, V_{sif} y V_{s3f} resultantes se muestran en la figura 6.

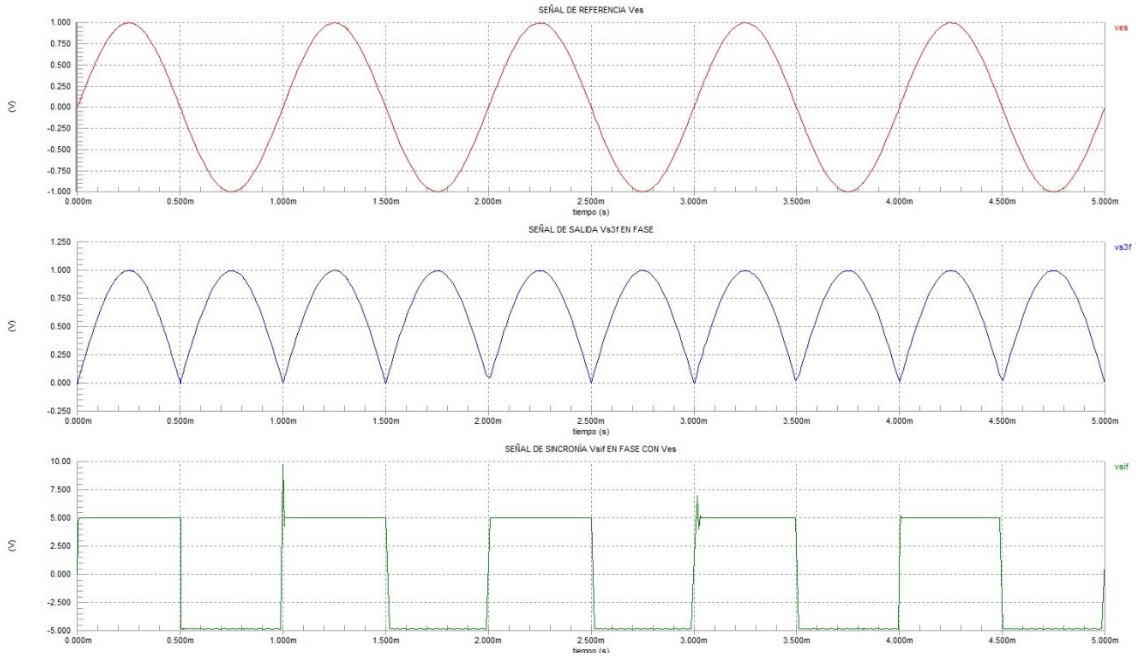


Figura 6. Señal de entrada senoidal V_{es} (arriba) en fase con la señal cuadrada de sincronía V_{sif} (abajo) y la señal de voltaje rectificada V_{s3f} (en medio) a la salida del demodulador síncrono.

3.3 Canal de voltaje de salida del DSF en fase

A la salida del canal de DSF en fase se obtiene un voltaje de corriente directa V_{fcd} proporcional al voltaje V_{es} que alimenta al circuito *RC* y a las ganancias en cada etapa del SMV. La señal de voltaje V_{s3f} se hace pasar por una etapa de filtrado paso bajo del tipo butterworth con configuración Sallen & key de segundo orden con ganancia unitaria y frecuencia de corte de 10 Hz. El voltaje de salida V_{fcd} de esta etapa de filtrado se expresa como,

$$V_{fcd} = G_D \overline{V}_{s3f} = \frac{1}{2\pi}\left(\int_0^{\pi} V_{s3f}\, d\omega t + \int_{\pi}^{2\pi} -V_{s3f}\, d\omega t \right). \tag{6}$$

Finalmente, el voltaje de salida V_{fcd} se calcula como el valor medio del voltaje de salida del DMS V_{s3f}, y se representa con la siguiente expresión,

$$V_{fcd} = \frac{G_D}{2\pi}\left[\int_0^{\pi} A sen(\omega t + \varnothing)\, d\omega t - \int_{\pi}^{2\pi} A sen(\omega t + \varnothing)\, d\omega t \right] = G_1 G_2 \left(\frac{2A}{\pi} \right) \cos \varnothing \ . \tag{7}$$

Como se puede observar el resultado representa un voltaje de corriente directa V_{fcd} a la salida de la etapa de filtrado que se encuentra en función del ángulo Φ, de la amplitud *A* de la señal V_{es}, de las ganancias respectivas de cada etapa de amplificación G_1 y G_2 y de las ganancias unitarias de las etapas de demodulación síncrona y de filtrado paso bajo. Sustituyendo *R* y R_1 en las ganancias de la componente resistiva de la ecuación (1) en la ecuación (7) se obtiene la siguiente expresión,

$$V_{fcd} = \frac{R_1}{R}\left(\frac{2A}{\pi} \right) \cos \varnothing \ . \tag{8}$$

La señal de voltaje en fase V_{fcd} de salida del filtro paso bajas representa el voltaje del canal de salida del DSF en fase con un ángulo $\Phi = 0°$ y se muestra en la figura 8 como un voltaje de corriente directa.

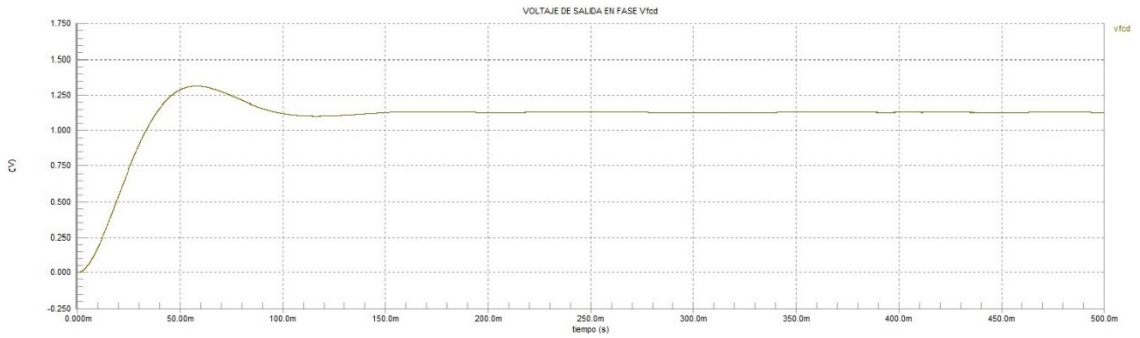


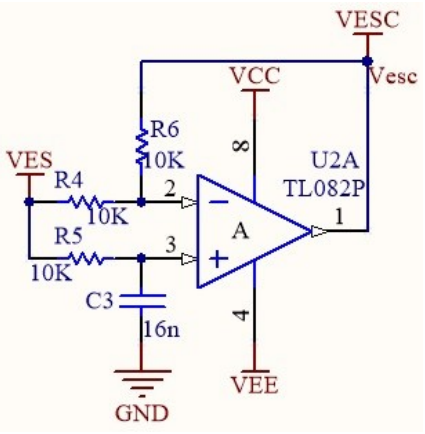
Figura 7. Señal de voltaje V_{fcd} de salida del filtro paso bajas para el canal de demodulación síncrona en fase.

El valor de *R* del circuito *RC* se obtiene de la ecuación (8) en función del voltaje V_{fcd} como,

$$R = \frac{R_1}{V_{fcd}}\left(\frac{2A}{\pi}\right). \tag{9}$$

3.4 Demodulación síncrona en cuadratura

Para analizar la etapa de demodulación síncrona en cuadratura se realiza un análisis de función de transferencia similar a la vista anteriormente. El voltaje de salida de la etapa de amplificación V_{S2} entra a una segunda etapa de demodulación síncrona en cuadratura en donde el voltaje senoidal V_{es} entra primero a una etapa cambiadora de fase de 90º con ganancia unitaria, figura 8, y de esta forma obtener en su salida el voltaje V_{esc} en cuadratura o desfasado 90°con respecto del voltaje V_{es}.



Para que este circuito realice el desfasamiento del voltaje V_{es} se fijan los valores de las resistencias *R4=R5=R6=10 KΩ*, la frecuencia *f=1KHz* y se calcula el valor del capacitor para un ángulo de desfasamiento de Φ= 90° con la siguiente expresión,

$$C3=\frac{\tan\frac{\Phi}{2}}{\omega R4} \quad (10)$$

La señal de voltaje V_{esc} entra a un circuito comparador U3B del cual se obtiene una señal cuadrada de sincronía V_{sic} en cuadratura con V_{es} y con la

Figura 8. Circuito desfasador de 90°

misma frecuencia de sincronización de los interruptores analógicos INT para conmutar otra etapa diferencial. Estos en conjunto forman una segunda etapa de demodulación síncrona con la misma secuencia de conmutación que se presentó en la tabla 1. La señal de voltaje V_{s4c} que se obtiene queda en función del *senΦ*, para después pasar por una etapa de filtrado paso bajo con las mismas características al mencionado anteriormente, como se muestra en la figura 9.

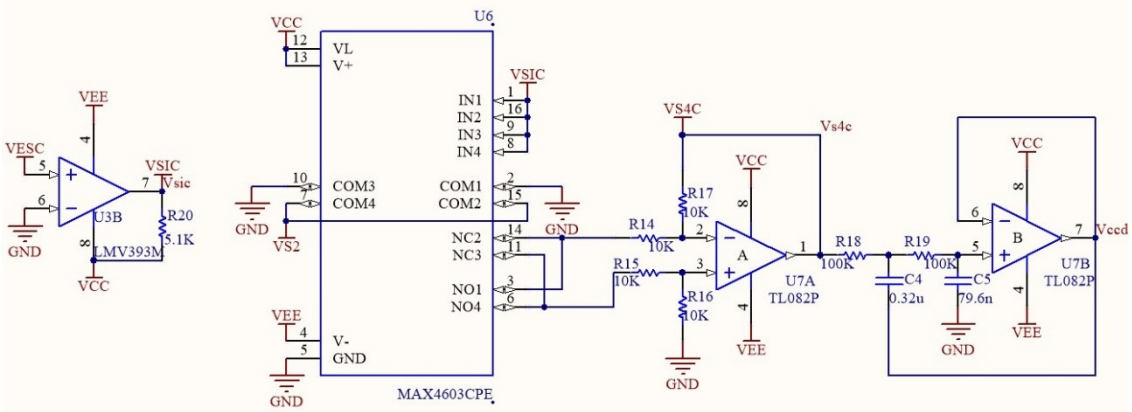


Figura 9. Circuito de detección sensible a la fase (DSF) basado en demodulación síncrona en cuadratura.

Para comprobar que la etapa de demodulación síncrona en cuadratura funciona correctamente se sustituye la señal de voltaje senoidal V_{es} en lugar de la señal de voltaje V_{s2}, señal de voltaje de salida de la etapa de amplificación, en las entradas COM4 y COM2 del circuito integrado U6. Las señales V_{es}, V_{sic} y V_{s4c} resultantes se muestran en la figura 10.

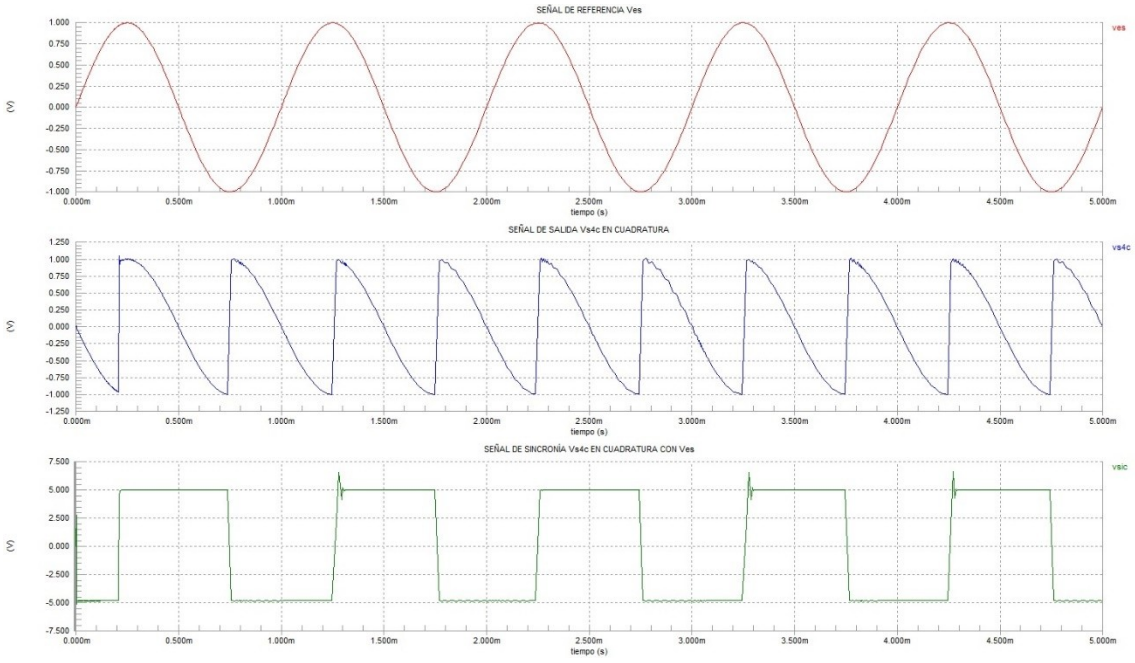


Figura 10. Señal de entrada senoidal V_{es} (arriba) en cuadratura con la señal cuadrada de sincronía V_{sic} (abajo) y la señal de voltaje proporcional media V_{s4c} (en medio) a la salida del demodulador síncrono.

Con esto aseguramos que las señales de voltaje V_{es} y la señal cuadrada de sincronía V_{sic} están en cuadratura y que la señal de voltaje de salida V_{s4c} del demodulador síncrono muestra una señal proporcional media arriba y abajo del nivel de cero, que es característica del demodulador síncrono en cuadratura, como se muestra en la figura 10 [2].

3.5 Canal de salida de voltaje del DFS en cuadratura

A la salida del canal de DSF en cuadratura se obtiene un voltaje de corriente directa V_{ccd} proporcional al voltaje V_{es} que alimenta al circuito *RC* y a las ganancias en cada etapa del SMV. La señal de voltaje V_{s4c} pasa por una etapa de filtrado paso bajo con las mismas características que en la primera etapa. Para obtener la expresión del voltaje de salida V_{ccd} se realiza un análisis de función de transferencia similar a la del canal DSF en fase pero que en este caso con un desfasamiento de 90° entre V_{es} y V_{sic}, y se calcula el valor medio del voltaje V_{s4c} de salida del DMS en cuadratura. Después, se sustituyen las ganancias respectivas de las etapas de amplificación G_1 y G_2 y de las ganancias unitarias de las etapas de demodulación síncrona y de filtrado paso bajo, quedando al final la siguiente expresión en función de la componente seno,

$$V_{ccd} = G_1 G_2 \left(\frac{2A}{\pi} \right) sen \varnothing \ . \tag{11}$$

Sustituyendo X_C y R_1 en las ganancias de la componente reactiva de la ecuación (1) en la ecuación (11) se obtiene la siguiente expresión,

$$V_{ccd} = \left(\frac{R_1}{\frac{1}{\omega C}} \right) \left(\frac{2A}{\pi} \right) sen \varnothing \quad . \tag{12}$$

La señal de voltaje en cuadratura V_{ccd} de salida del filtro paso bajas representa el voltaje del canal de salida del DFS en cuadratura (con un ángulo $\Phi = 90^{o}$) y se muestra en la figura 11 como un voltaje de corriente directa.

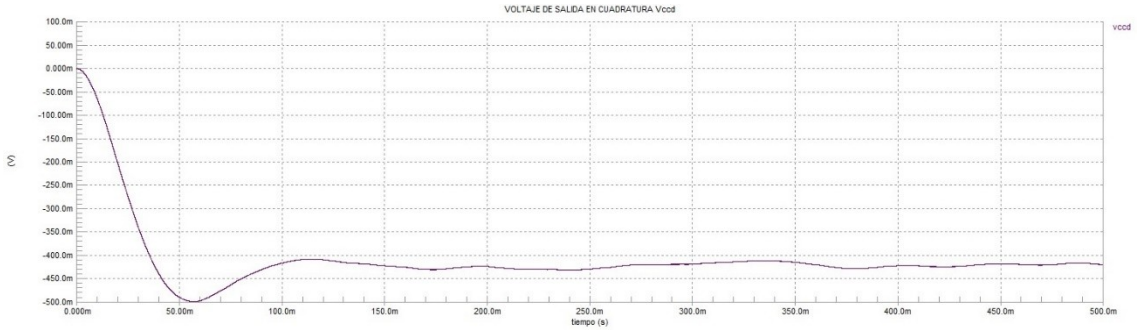


Figura 11. Señal de voltaje V_{ccd} de salida del filtro paso bajas para el canal de demodulación síncrona en cuadratura.

El voltaje negativo de salida V_{ccd} del canal de DSF en cuadratura representa un ángulo θ de retraso en la señal de voltaje V_{s2} con respecto de la señal de voltaje V_{es}, como se muestra en la figura 3. Sin embargo, se utiliza el valor absoluto solamente para el cálculo de la capacitancia. De esta forma el valor de la capacitancia C en función del voltaje V_{ccd} y del ángulo $\Phi = 90^{o}$ se obtiene con la siguiente ecuación,

$$C = \frac{1}{\omega R 1 \left(\frac{2A}{\pi V_{ccd}} \right)} . \tag{13}$$

Como se puede observar, las expresiones (9) y (13) para el cálculo de R y C respectivamente, quedan en función de los voltajes de salida V_{fcd} y V_{ccd} obtenidos directamente de las simulaciones del SMV y de las ganancias en sus correspondientes componentes resistiva y reactiva del circuito RC.

4.Resultados

Se realizaron simulaciones con el SMV propuesto con un circuito RC en paralelo variando el valor de resistencia ideal y manteniendo el valor del capacitor ideal constante. Los valores de voltajes V_{fcd} y V_{ccd} obtenidos se sustituyen en las expresiones (9) y (13) correspondientes para calcular $R_S(V_{fcd})$ y $C_S(V_{ccd})$. Con los valores de R y C ideales y simulados se obtiene el error relativo para cada uno tomando como valores verdaderos los ideales. Además se calcularon los valores de impedancia Z y ángulo de desfasamiento θ aplicando los conceptos teóricos de impedancia eléctrica utilizando los valores de R y C ideales propuestos y los obtenidos con las simulaciones, con el fin de realizar una comparación entre estos.

Se completó una tabla de valores de R y C propuestos y otros datos como la frecuencia f, la capacitancia C_3 del desfasador, la resistencia R_1 y la ganancia G_1 de la etapa de amplificación A, la impedancia teórica Z_T calculada, el ángulo teórico θ_T calculado, los voltajes de salida obtenidos V_{fcd} y V_{ccd}, los valores de $R_S(V_{fcd})$ y $C_S(V_{ccd})$, la impedancia Z_S y el ángulo θ_S calculados con los datos obtenidos de la simulación y los porcentajes de error relativo E_R y E_C correspondientes a R, C, R_S y C_S, como se muestra en la tabla 2.

Tabla 2. Datos iniciales propuestos, datos teóricos calculados y datos calculados en función de los obtenidos con las simulaciones del circuito del SMV.

Datos iniciales propuestos					**Datos teóricos calculados**			**Datos calculados en función de V_{fcd} y $-V_{ccd}$ obtenidos de las simulaciones del SMZ**							
f [KHz]	C_3 [nF]	R_1 [KΩ]	R [KΩ]	C [nF]	G_1 [V]	Z_T [KΩ]	θ_T [°]	V_{fcd} [V]	$-V_{ccd}$ [V]	R_S [KΩ]	C_S [nF]	Z_S [KΩ]	θ_S [°]	$\%E_R$	$\%E_C$
1	16	10	5.6	10	1.9	5.3	19.4	1.13	0.42	5.63	10.5	5.3	20.4	0.5	5

			10		1.2	8.5	32.14	0.63	0.415	10.1	10.4	8.4	33.4	1	4
			20		0.8	12.45	51.5	0.315	0.405	20.2	10.1	12.42	52.1	1	1

Con los datos iniciales de *f, C_3, R_1, R y C*, en donde el valor de *R* tiene tres valores distintos y los otros mantienen su valor, se calcularon los datos teóricos de G_1, Z_T, θ_T. Se realizaron 3 simulaciones para obtener tres valores de V_{fcd} y V_{ccd} correspondientes a la componente resistiva y reactiva. Después se calcularon tres valores para R_S y C_S y en función de estos sus respectivos valores de Z_S, θ_S, y finalmente, se calcularon sus respectivos valores de porcentajes de error relativo absoluto E_r para *R* y *C*, como se muestra en la tabla 2.

Se realizaron mediciones experimentales con un medidor LCR Keysight E4980AL para medir componentes resistivos y capacitivos comerciales con los valores propuestos anteriormente, *R=5.6KΩ*, *R=10KΩ*, *R=20KΩ* y *C=10nF* con tolerancias de *±5%* cada una. Además se realizaron mediciones directas de impedancia de circuitos RC en paralelo con el medidor LCR y se compararon con los valores de impedancia calculados en función de los voltajes obtenidos de las simulaciones del SMV. Los resultados se muestran en la tabla 3.

Tabla 3. Comparación de los datos calculados con los voltajes obtenidos de las simulaciones del SMV y con los datos obtenidos con el medidor LCR, utilizando valores de resistencia y capacitancia comerciales con tolerancias del ±5%.

Datos calculados en función de simulaciones					**Datos calculados en función del medidor LCR**					
f ***[KHz]***	***R_S*** [KΩ]	***C_S*** [nF]	***Z_S*** [KΩ]	***θ_S*** [°]	***R_M*** [KΩ]	***C_M*** [nF]	***Z_M*** [KΩ]	***θ_M*** [°]	***%Er*** *R*	***%Er*** *C*
1	5.63	10.5	5.3	20.4	5.76	9.52	5.33	18.85	2.86	4.8
1	10.1	10.4	8.4	33.4	9.95	9.52	8.3	29.92	0.5	4.8
1	20.2	10.1	12.42	52.1	19.91	9.52	12.32	48	0.25	4.8

Con los valores de R_M y C_M se calculó el valor absoluto del porcentaje de error relativo E_r con respecto de los valores ideales propuestos para R y C, como se muestra en la tabla 3.

Como se puede observar los resultados obtenidos con las simulaciones del SMV difieren poco de los valores medidos con el LCR debido a las tolerancias de cada elemento resistivo y capacitivo comercial utilizado, los cuales se encuentran dentro del ±5% de tolerancia indicado.

5.Conclusiones

Los valores obtenidos de R y C con las simulaciones del SMV son muy aproximados con los valores ideales propuestos obteniendo un error máximo del 5% con el capacitor. Así como con los valores de R y C comerciales medidos con el medidor LCR que también presentaron un error máximo del 4.8% el cual es debido a la tolerancia presentada por cada uno de los dispositivos comerciales utilizados. Estos resultados se resumen en las tablas 2 y 3, en donde se pueden comparar los valores teóricos de impedancia Z y ángulo de desfasamiento θ, ideales, simulados y medidos experimentalmente. Los resultados teóricos y experimentales validan los valores obtenidos con las simulaciones del SMV propuesto. En este caso se utilizó el programa Altium Designer para realizar las simulaciones del circuito electrónico, sin embargo es posible utilizar otro programa de diseño electrónico.

La simulación de la etapa de demodulación síncrona para la obtención de las componentes resistiva y reactiva de un circuito RC en paralelo facilita el entendimiento del concepto de impedancia por medio del análisis de las funciones de transferencia y con la visualización de las señales en cada etapa del SMV. Las simulaciones se pueden utilizar de forma didáctica y aplicable para comprender los conceptos teóricos involucrados en la impedancia eléctrica puesto que se comprueban con resultados obtenidos teóricamente.

El SMV propuesto puede simplificarse sin embargo las configuraciones utilizadas también ayudan a comprender y/o reforzar algunos conceptos utilizados en electrónica analógica de una forma modular y aplicable en el campo de la instrumentación para la medición de impedancia.

Finalmente, es posible mostrar de una manera simplificada la aplicación de los números complejos en un sistema de medición teórico en forma fasorial mostrando el ángulo de desfasamiento de las señales analógicas de entrada y salida por medio de un diagrama de bloques de un sistema de medición sin entrar a fondo en el análisis del funcionamiento de cada etapa que lo conforma.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a la Dirección de General de Asuntos del Personal Académico (DGAPA) de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM) por medio del proyecto PAPIME PE107319.

6. Referencias

1. Wuqiang Yang, Teaching phase-sensitive demodulation for signal conditioning to undergraduate students, Am. J. Phys. 78 (9), September 2010.
2. M L Made, Advances in Lock-in amplifiers, J. Phys. E: Sci. Instrum., vol 15, 1982.

Student-led scientific research experiences as a tool for early training of young scientists in a computational medical physics research laboratory

Porras-Chaverri, M.A. [1,2], Alvarado-Jiménez, C., [1,2] Wolter, L.C., [3]

Iannarella-Arguedas, N.[2], Elizondo-Blanco, D.[2], Noguera-Vega, G. [1]

[1]Centro de Investigación en Ciencias Atómicas, Nucleares y Moleculares (CICANUM), Universidad de Costa Rica.

[2]Escuela de Física, Universidad de Costa Rica

[3]Martin-Luther-Universität Halle-Wittenberg

mariela.porras@ucr.ac.cr, catalina.alvaradojimenez@ucr.ac.cr, natalia.iannarella@ucr.ac.cr, daniel.elizondoblanco@ucr.ac.cr, gerardo.nogueravega@ucr.ac.cr

1. Abstract

In addition to a profound understanding of the field of interest, scientific research requires the combined use of a variety of non-technical skills (soft skills). Typically, such skills are honed at the graduate level during the thesis research work.

However, allowing undergraduate students to actively develop a research project, unbounded by the confines of coursework, provides them with a learning experience that more closely matches the challenges of scientific research.

This work presents the learning experience of undergraduate physics students undertaking a research project in medical physics, with an emphasis on their development of soft skills. The work was supervised by two medical physics researchers, with one of the students in a leadership role.

Our results show that this kind of experiences, in parallel to academic training, allows students to find the limits of their abilities, as well as develop soft skills necessary for their future work as scientists.

2. Introduction

Computational Medical Physics is a vast and multidisciplinary field which requires its researchers to be familiar with different areas of knowledge.

In the case of the research conducted at the Computational Medical Physics Laboratory (FIMEC) of the University of Costa Rica (UCR), it combines knowledge on the physics and biology of the interactions of ionizing radiation in human tissues and tissue-equivalent materials with knowledge of the different computational methods used in image analysis and radiation transport simulation[1].

Such a diverse body of knowledge can only be developed through extensive training which typically starts at the graduate studies level. At UCR, a Master of Medical Physics Program is available for physics graduates interested in pursuing a career in this field [2].

This work presents some of the experiences at FIMEC in preparing undergraduate physics students for the development of independent scientific research.

The aim of these experiences is to provide students with both guidance and freedom to develop their own skills as young scientists, in preparation for the work they will undertake as medical physics graduate students and future professionals [3][4].

In particular, the work presented here corresponds to the educational experiences undertaken in the development of scientific research work, done in collaboration with the Laboratory of Ionizing Radiation Metrology (LMRI), also at CICANUM.

The collaboration aims to provide LMRI with computational models for radiation transport using the particulars of the LMRI experimental apparatuses. One of these models relates to the measurement of flatness of the photon energy deposited across the irradiation field of the Cs-137 source at LMRI.

This project was selected because it combines a variety of knowledge fields, while still being achievable for a group of undergraduate students in the early stages of their studies (as early as second year).

3. Experimental conditions

The group of students involved in this work is constituted by three undergraduate physics students from the University of Costa Rica (referred to as Students A, B and C), in addition to a graduate summer intern from a German institution, referred to as Student D, who was involved in the project for six weeks. All students were volunteers who approached the supervisors, motivated by an interest in pursuing graduate medical physics studies in the future.

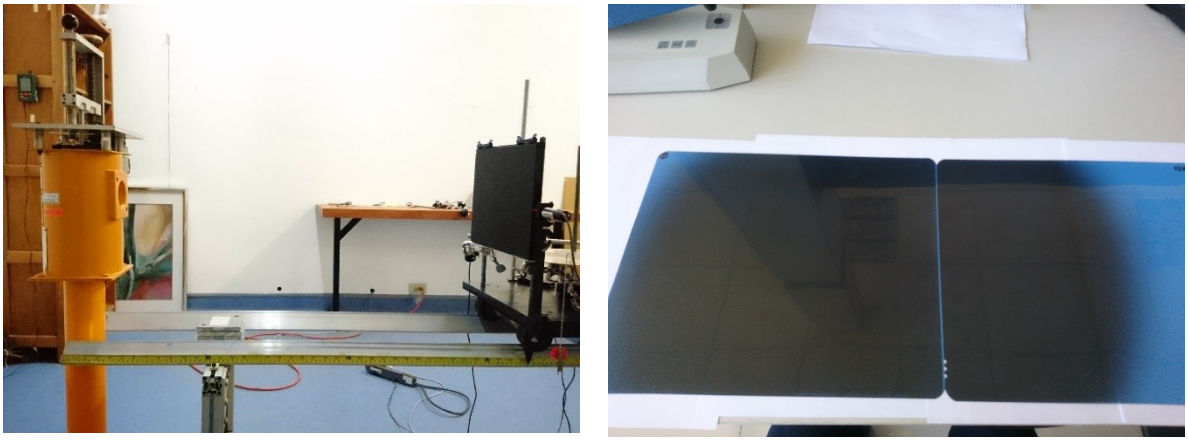
One of the students, Student A, has been involved in the collaboration since its inception, while the other two (B and C) joined at different later stages, with Student C, joining the most recently. In this group, Student A has been functioning as the student leader.

All activities were performed under the guidance of senior researchers from LMRI and FIMEC. During the development of this project the supervisors acted as a guide giving broad instructions and general tasks, to allow the students to develop their own ideas and methods.

Alongside the researcher from LMRI, student A designed and developed the sets of measurements to determine the flatness of field for the Cs-137. This measurement work involved the irradiation of radiographic films with the radiation source and the development of this film. Images from the irradiation geometry and the resulting irradiated radiographic films are shown in Figure 1.

Student A then used a densitometer to measure the optical density at points of interest in the films. Student A also started training in the use of Geant4 for radiation transport simulations. Because Student A was more advanced in their Geant4 training when the other students joined, Student A was also responsible for training and coordinating the work of the other students involved. All tasks related to the use of Geant4 and project administration were performed under the guidance of the researcher from FIMEC.

The experience of Student A was aimed to mimic some of the responsibilities in the role of a head of a research group, which encompasses aspects of both the project design, and its implementation, in addition to the supervision and coordination of other personnel. This point was made explicit to Student A as part of the mentoring during the development of these research activities.



(a) (b)

Figure 1. Images from the measurement procedure performed by Student A (a) Experimental setup for irradiation with Cs-137 source (b) Radiographic film after irradiation (Illustrative purposes)

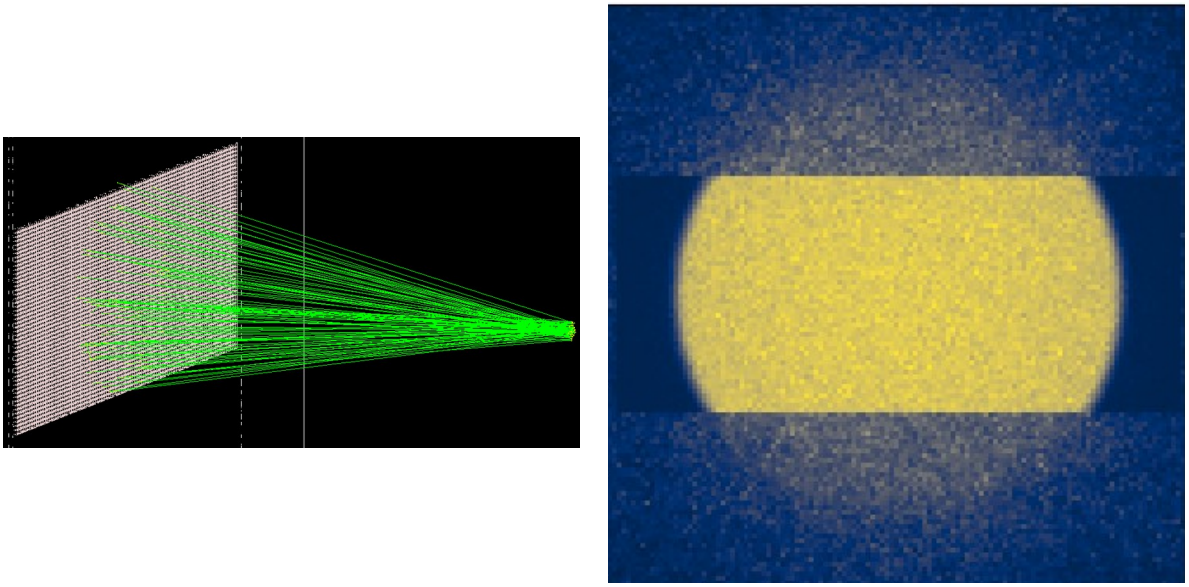
During the development of this project, Students B and C, were tasked with searching and writing a literature review on two separate topics related to the research work. Student B reviewed literature on the topics of the computational methods used in this project, in particular the use of Geant4, while Student C focused on general topics in ionizing radiation metrology and calibration laboratories.

The students were provided with guidance on the topic and references for them to start their search, as well as some resources that could be used to search for scientific literature in those subjects. The idea behind this task is to provide students with experience in using scientific literature resources, as well as putting in practice their critical thinking skills when selecting resources to include as part of their review. The main instruction to the students was to develop a literature review that could be used in the future preparation of a scientific article, with a strong emphasis on the importance of good citation and reference management practices. As the final product of this activity each student delivered a brief document with their summarized findings.

In the case of Student D, being an international summer intern and not taking classes, they were able to devote all their time to work on their internship tasks. In addition, this student had also recently finished their bachelor's program, which included some basic classes in medical physics topics at the undergraduate level, and had enrolled in a master's program.

Their contribution was focused on developing the radiation transport simulation geometry using Geant4. Their work included modifying existing Geant4 codes to mimic the geometry of the measurements at LMRI, as well as developing auxiliary codes to extract the Geant4 simulation data.

This work was performed under the guidance of the FIMEC supervisor. Students A and D worked together in determining the geometric parameters for the simulation, as well as performing the initial analysis of the simulation data. Images from the radiation transport simulation are shown in Figure 2.



(a) (b)

Figure 2. Images from the irradiation simulation performed by Student D (a) Simulated film irradiation with a Cs-137 source, based on the geometry shown in Figure 1a (b) Results of the simulated film irradiation (Illustrative purposes)

Student D is a native German speaker, with a high-level command of written and oral English as a second language. This situation allowed the undergraduate students to practice their oral English skills. Additionally, students were recommended to submit their written materials in English, such as the literature review and research documentation. Although the undergraduate students have varying levels of oral and written English, they were able to perform these actions with help from their supervisors and colleagues.

One particularity of this project is that it is an ongoing work, and as such was affected by the recent COVID-19 situation. As such, the most recent collaborations, (including the last couple of weeks in Student D's internship) and meetings have been performed via teleconference. Although a lot of the coordination and guidance in this project had been developed making use of online resources (such as online chat, email and cloud files storage), the new change in dynamic has brought the opportunity to develop skills in working at a distance with future colleagues abroad.

In order to determine the scope of the learning experience for the students involved they were asked to provide a text in which they would share their challenges during the project and areas in which they consider the project has helped them gain knowledge. They were instructed to go beyond technical knowledge and focus on their development of soft skills. These texts were mined for concepts and ideas related to the learning experiences of each student. All text analysis was done using QDA Miner Lite (v2.0.6 Provalis Research) to classify the ideas presented by the students according to the different skills categories mentioned.

4. Results and discussion

According to the student testimonials, working on this project has helped them gain a wide variety of skills. In particular, the skills and knowledges mentioned by the students are presented and classified as shown in Table 1. For the purposes of this work, they were grouped into four categories:

a. Technical skills: all skills and knowledge related to the technical aspects of scientific work, such as knowledge of basic concepts in a field, and experiences that extend the topics studied in a physics program. This category also includes critical thinking and problem-solving skills.
b. Organizational skills: all skills related to management of different resources, for example, time management.
c. Communication skills: related to the expression and discussion of ideas and scientific results, including written and oral communication in Spanish, as well as in English. Additionally, intercultural communication and skills related to interactions via virtual resources.
d. Emotional skills: all skills related to the emotional development of the students, such as, resilience and the development of communal ties between the students.

TABLE 1 SKILLS DEVELOPED DURING THIS RESEARCH WORK, AS REPORTED BY THE STUDENTS

Technical Skills	Organizational Skills	Communication	Emotional Skills
Programming	Time management	Written communication (Spanish)	Resilience
Medical Physics knowledge	Human resource management	Oral communication	Creativity
	Literature research management		

Computational Physics knowledge Extension of coursework Problem solving / Critical thinking	Record keeping	(Spanish) Written communication (English) Oral communication (English) Virtual communication Intercultural communication	Self-confidence Stress management Teamwork Community building Ethical behaviors

As expected, working on this project has allowed the students to develop their communication skills, particularly those related to the presentation of research work and the discussion of their findings with their colleagues and supervisors.

In addition, the challenge of producing writings in English, and having to communicate with the summer intern in this language, allowed them to practice their English-speaking skills.

Moreover, the current COVID-19 situation has affected the way interactions are conducted in virtual settings, and in particular, the final part of the summer internship had to take place remotely (as the intern was repatriated early to their homeland). This gave the chance to some of the students to navigate the experience of planning international online meetings and gave them the opportunity to practice communication skills for a virtual and globalized world.

Students also reported that working on this project helped them organize their time better, to be able to fulfill the expectations of the research group while also managing their coursework.

Furthermore, by having to work out the solutions to the problems they encountered, they were able to exercise their critical thinking and problem-solving skills, as well as their resilience and self-confidence skills.

An important observation from the students is that the kind of activities that they had to undertake in the development of this project were found to go beyond the scope of those done during their physics mayor classes, including laboratory courses.

It is important to mention that the physics program at UCR includes a two-semester long course in which the students must plan and develop their own research project. Said project, however, is to be done individually and under supervision of a professor, and the students involved in the work presented here have not yet taken this class.

One of the surprising aspects of these results was to realize how important the teamwork aspects were in developing a variety of skills, not only in the communication category, but also in the emotional category. As per the reports of the students, the work of their colleagues inspired them to do better at their tasks and has increased their self-confidence. From their testimonials it can be inferred that having this experience together has brought them a sense of community and shared responsibility.

This points us to the role of learning communities in the training of young scientists, in which they can work in teams for a common goal under an environment of empathy and intellectual freedom.

On the part of the supervisors, it has been observed that the students have maintained the interest and commitment to the project at all stages. Each student has contributed according to their assigned tasks and have had an active role in shaping the methodology and resources used to accomplish them. Thorough the discussions, the students have brough up their ideas and questions, and have proposed solutions in accordance to their education level.

An interesting point to mention, is that even the initial development of this article was a decision made jointly by Student A, as student leader, and by one of the supervisors. All the other members of the team collaborated in the development of the final document.

This had the additional benefit of providing students with the opportunity of preparing an article for a conference, even if their project is still at a too early stage to participate as a medical physics contribution. Furthermore, this kind of analysis of their own experiences under an educational framework serves as an additional instrument for their self-growth as scientists.

Despite the positive developments in this project, it must be noted that this kind of initiative requires a significant investment of the supervisors' time, particularly in the early stages of the project and during the training for more technically complex tools (such as Geant4).

The supervisors, however, consider that this time investment will bring forth its benefits in the future, as the students will be more familiar with the tools when developing their thesis research and will have the capability to participate as supervisors of younger students. This has the potential to allow for richer master's level research, as well as the chance to create a common culture of empathy and collaboration with these future colleagues. The supervisors consider that this could only benefit our institutions and the development of our country.

5. Conclusions

Based on the results from this work, it can be concluded that providing students with basic guidance and letting them exercise their intellectual freedom brings up a sense of shared responsibility that motivates and challenges students, particularly , when accompanied by an open and questioning learning community.

One of the main points in this experience is that great part of its benefit derives from having it occur outside of coursework. This circumstance allowed the students to explore the limits of their own skills and commitment in a setting that aims to resemble the realities of scientific work.

This raises the need to provide more undergraduate students with the opportunity to participate in similar experiences. Such experiences may help students not only develop their technical and soft skills, but also make informed decisions regarding their future career plans.

Finally, providing these opportunities from an early stage of the students' education allows them to incorporate these skills and knowledge into their other classes, and will better prepare them for their future professions.

6. Bibliography

1. *Laboratorio de Física Médica Computacional (FIMEC).*CICANUM-Universidad de Costa Rica. August 07. Accessed May 14, 2020. http://cicanum.ucr.ac.cr/es/component/content/article.html?id=95&Itemid=539.

2. Kondo, Anne E., and Justin D. Fair. "Insight into the chemistry skills gap: the duality between expected and desired skills." *Journal of Chemical Education* 3 (94): 304-310, 2016

3. Sarkar, Mahbub, Tina Overton, Christopher Thompson, and Gerry Rayner. "Graduate employability: views of recent science graduates and employers." *International Journal of Innovation in Science and Mathematics Education* 3 (24): 31-48, 2016

SEP-UCR. n.d. *Maestría Académica en Física Médica.* Sistema de Estudios de Posgrado - Universidad de Costa Rica. Accessed 05 14, 2020. https://www.sep.ucr.ac.cr/index.php?option=com_sppagebuilder&view=page&id=530

Estudio comparativo de la adsorción de aluminio de soluciones acuosas usando quitosano y cascarilla de arroz

Álvarez Trejos, A. K., Blanco González, V. A., Benavente Silva, M.

Facultad de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Ingeniería

carolalvareztrejos@gmail.com, vaneblanco25@hotmail.com, martha.benavente@fiq.uni.edu.ni

1. Resumen

Este trabajo comprende el estudio comparativo del equilibrio y cinética de adsorción de aluminio en quitosano y en cascarilla de arroz, y su aplicación en muestras de aguas potable. El estudio involucró la determinación del pH de máxima adsorción del ion en un intervalo de pH de 4 a 7. Los resultados muestran que la adsorción del ion depende del pH, siendo el mayor porcentaje de remoción a pH 5 en quitosano y a pH 6 en cascarilla de arroz. La evaluación de los datos de equilibrio de adsorción mostró, que para ambos bioadsorbentes, hubo un mejor ajuste al modelo de Freundlich. Los resultados experimentales de la cinética de adsorción mostraron una buena correlación con el modelo de pseudo segundo orden. Así también, la eficacia de ambos bioadsorbentes en la adsorción de aluminio de muestras de aguas potable fue comprobada, con porcentajes de remoción mayores al 95%.

2. Introducción

En el proceso de la potabilización del agua para el consumo humano se emplean coagulantes con el propósito de neutralizar la carga de los coloides generalmente electronegativos, presentes en el agua, formando un precipitado. En Nicaragua, las sales de aluminio son utilizadas como coagulantes en los sistemas de tratamiento de agua potable.

Diversos trabajos han estudiado el contenido de aluminio en el agua potable [1,2], ya que, cuando sobrepasa los niveles permitidos por las normas CAPRE (0.2 mg/L), se alteran las propiedades organolépticas del agua y puede provocar diversas enfermedades, tales como la enfermedad de Alzheimer, hipoalbuminemia y anemia [3].

En una evaluación de la calidad del agua potable en cuatro plantas potabilizadoras de la región Boaco-Chontales, para el período 2003-2007, se encontró que el agua potable producida por las plantas de tratamiento de agua potable de Santo Tomás, Juigalpa, Camoapa y Boaco, los niveles de aluminio sobrepasaban el valor máximo admisible de aluminio, siendo el agua potable de Juigalpa la que contenía la mayor concentración de aluminio (19.3 mg/L) [4].

Una alternativa de bajos costos, alta disponibilidad y amigable con el ambiente para la eliminación de iones metálicos es la bioadsorción, usando materiales biológicos como quitosano y cascarilla de arroz. El quitosano, un polisacárido que se puede obtener a partir de exoesqueletos de crustáceos, moluscos e insectos, ha sido usado, desde hace varios años, en el tratamiento de agua como adsorbente para remover metales pesados [5]. Por otra parte, la cascarilla de arroz, un desecho que actualmente se ha convertido en un subproducto agrícola importante, ha sido reportado como un buen adsorbente para la remoción de metales pesados, fenoles, pesticidas y tintes [6]. De acuerdo a Herrera, Hormanza y Gallego [7], la capacidad de adsorción de la cascarilla de arroz se debe a los compuestos lignocelulósicos que posee, los cuales se caracterizan por tener grupos funcionales ácidos y alcoholes fenilpropílicos en su estructura.

El principal objetivo de este estudio fue comparar la efectividad del quitosano y de la cascarilla de arroz para la remoción del aluminio de aguas sintéticas y agua potable. Así como, reducir el impacto ambiental negativo de los residuos generados por la industria agrícola y acuícola al utilizarlos como adsorbentes de metales pesados.

3. Condiciones experimentales

3.1 Preparación y caracterización de los bioadsorbentes

Para la obtención del quitosano se usó caparazón de camarón proporcionado por la Empresa NicaFish. Primeramente, se llevó a cabo la extracción de quitina mediante la desproteinización, desmineralización y blanqueo del caparazón. Seguidamente, se obtuvo el quitosano por desacetilación básica de la quitina. El material obtenido fue triturado y tamizado a un tamaño de partícula entre 0.22 y 0.45 mm.

La cascarilla de arroz (denominada Palo 2) fue suministrada por el trillo San Juan, ubicado en San Isidro, Matagalpa. La preparación de la cascarilla de arroz involucró el lavado del material para eliminar la suciedad, secado en un horno a 70°C, trituración y tamizado a un tamaño de partícula de 0.22 a 0.45 mm. Cada uno de los materiales fue caracterizado por Espectroscopia infrarroja (IR), utilizando un Espectrómetro infrarrojo por transformada de Fourier (FT-IR) con accesorio ALPHA T, antes y después de ser sometidos al proceso de adsorción del ion aluminio.

3.2 Efecto del pH inicial en el porcentaje de remoción de aluminio

El efecto del pH en el porcentaje de remoción del aluminio en quitosano y cascarilla de arroz fue estudiado en un intervalo de pH de 4 a 7, ya que altos valores de pH producen una reacción de hidrólisis del ion en solución acuosa, la cual provoca la formación de precipitados de sales básicas de aluminio [8]. El pH inicial de la solución fue regulado por la adición de soluciones de ácido clorhídrico (HCl) 1.25 M o hidróxido de sodio (NaOH) al 0.3% y 3%.

Para la parte experimental, 1 g del bioadsorbente se puso en contacto con 100 ml de una solución del ion aluminio de 50 mg/l, ajustada al pH inicial. Posteriormente, la mezcla se agitó durante una 1 hora y a una velocidad de agitación de 250 rpm. Finalmente, la mezcla se filtró y se determinó la concentración de aluminio en la solución por Espectroscopia de absorción atómica usando un equipo marca GBC, modelo AA 932, con llama. El porcentaje de remoción (%Remoción) de aluminio se calculó mediante la siguiente ecuación:

$$\%Remoción = \frac{(C_i - C_f)}{Ci} \times 100 \qquad (1)$$

Donde Ci y Cf son la concentración inicial y la concentración final del aluminio, respectivamente, en mg/l.

3.3 Determinación de las isotermas de adsorción de Aluminio

Soluciones de 50 ml del ion metálico a diferentes concentraciones, en un intervalo de 5 a 500 mg/l, fueron preparadas y ajustadas al pH de máxima de adsorción para cada bioadsorbente. A cada solución se le agregaron 2 g del bioadsorbente y las muestras se agitaron a 250 rpm por 3 horas. Al finalizar el proceso, las muestras fueron filtradas y se les determinó la concentración del ion aluminio en la solución. Con los datos experimentales, se calculó la capacidad de adsorción (q_e) del aluminio en el bioadsorbentes mediante la siguiente ecuación:

$$q_e = \frac{(C_i - C_f) \cdot V}{m} \quad (2)$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción (en mg/g), C_i y C_f son las concentraciones inicial y final, respectivamente, del aluminio en la solución (en mg/l), V es el volumen de la solución (en litros) y m es la masa del adsorbente (en g).

Los datos experimentales del equilibrio de adsorción fueron ajustados a los modelos linealizados de Freundlich (ecuación 3) y de Langmuir (ecuación 4).

$$\log q_e = \log a_F + b_F \cdot \log C_{eq} \quad (3)$$

$$\frac{C_{eq}}{q_e} = \frac{1}{q_{e,max}} C_{eq} + \frac{1}{q_{e,max} \cdot b} \quad (4)$$

Donde q_e es la capacidad de adsorción, en mg/g, C_{eq} es la concentración del ion aluminio en el equilibrio (en mg/l), a_F es la constante de la isoterma de Freundlich, en $mg^{1-bF} \cdot L^{bF}/g$, b_F es el parámetro empírico adimensional de Freundlich, $q_{e,max}$ es la máxima capacidad de adsorción, en mg/g, y b es la constante de equilibrio de adsorción de Langmuir, en l/mg.

3.4 Cinética de adsorción de Aluminio

Para este estudio, 5 g del bioadsorbente se puso en contacto con 1000 ml de una solución de aluminio de 60 mg/l a una velocidad de agitación constante de 250 rpm y temperatura ambiente por un tiempo de 8 h. A medida que transcurría el proceso de adsorción, se tomaron alícuotas de 10 ml de solución las cuales fueron analizadas para determinar la concentración del ion metálico. Con los datos experimentales, se calculó la capacidad de adsorción del aluminio en el bioadsorbente a un tiempo t (qt), utilizando la ecuación (2). Para determinar el mecanismo de la cinética de adsorción,

los datos experimentales fueron ajustados a los modelos de pseudo-primer orden (ecuación 5) y de pseudo-segundo orden (ecuación 6).

$$\ln\left(q_e - q_t\right) = lnq_e - k_1 t \quad (5)$$

$$\frac{t}{qt} = \frac{1}{k_2 q_e^2} + \frac{t}{q_e} \quad (6)$$

Donde k_1 (min^{-1}) es la velocidad de pseudo-primer orden, *qe* y *qt* (mg/g) corresponden a la cantidad de soluto adsorbido en el equilibrio y a un tiempo t, respectivamente, y k_2 (g/(mg. min)) es la constante de velocidad de pseudo-segundo orden.

3.5 Aplicación de los bioadsorbentes en agua potable

Para la aplicación de quitosano y cascarilla de arroz en aguas reales, se recolectaron muestras de agua de la Empresa Nicaragüense de Acueductos y Alcantarillados (ENACAL) – Planta Potabilizadora Isaac Deleo, ubicada en Juigalpa, Chontales. A las muestras se les determinó la concentración de aluminio por Espectroscopia de Absorción Atómica, antes y después de aplicado el bioadsorbente, para calcular el grado de remoción del aluminio presente en las muestras (ecuación 1).

4. Resultados y discusión

4.1 Caracterización de los bioadsorbente por Espectroscopia IR

La Figura 1 muestra los espectros IR del quitosano sin aluminio (línea continua) y con aluminio (línea discontinua). El espectro IR del quitosano sin aluminio exhibe una banda ancha de adsorción a 3446 cm^{-1} debido al estiramiento del grupo hidroxilo (O–H) y por las vibraciones de tensión de las aminas y amidas primarias, una banda de fuerte intensidad en 2910 cm^{-1} del grupo C–H, una banda de intensidad fuerte a 1664 cm^{-1} por las vibraciones de flexión de la amida I (–NH–C=O–) del grupo acetilo y de las aminas primarias ($–NH_2$), una banda a 1459 cm^{-1} por las vibraciones de flexión del grupo $–CH_3$, una banda de intensidad media a 1380 cm^{-1} debido al enlace C–N de la aminas y una banda de adsorción a 1100 cm^{-1} debido al estiramiento C–O–C del enlace glucosídico.

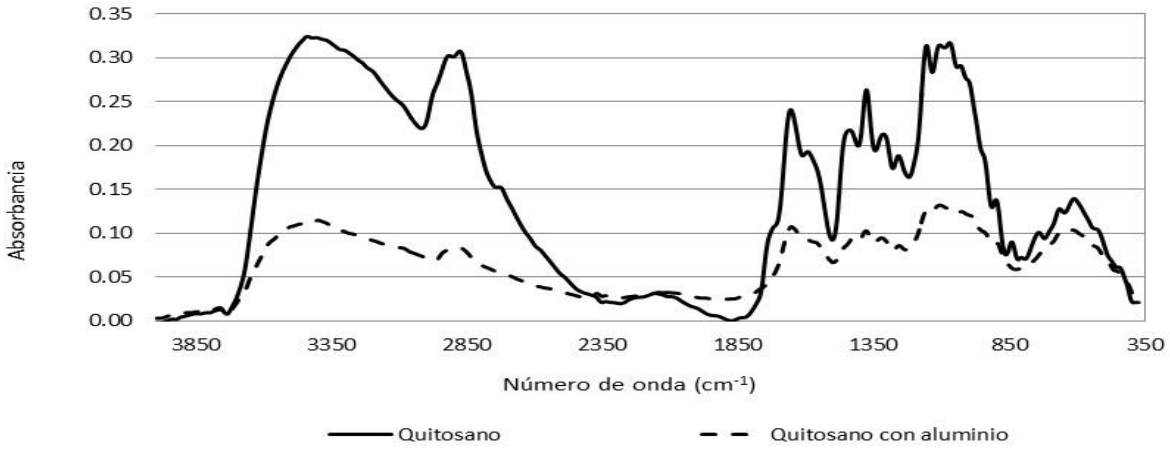


Figura 1. Espectros IR por transformada de Fourier del quitosano, sin y con la adsorción del ion aluminio.

Por su parte, el espectro IR del quitosano con aluminio (línea discontinua) presenta las mismas bandas de adsorción de los grupos funcionales característicos del quitosano. No obstante, las bandas a 1664 cm^{-1} y a 1380 cm^{-1} muestran depresiones, las cuales pueden deberse a la unión del grupo hidroxilo con el ion aluminio. Similares resultados fueron encontrados por Romero-Sevilla, Sánchez-Cuadra y Benavente[9], quienes observaron una ligera modificación en la región de 1640–1500 cm^{-1} asociada al enlace Cr–O, que da origen a una vibración de tensión por la saturación del adsorbente con el ion metálico [10].

Así también, en la Figura 1 se observa una depresión y un ligero desplazamiento de la banda ancha de adsorción a 3446 cm^{-1} atribuida a los grupos hidroxilo, lo cual puede ser producto de la formación del complejo Quitosano–Al. Esta observación concuerda con lo reportado por Flores-Alamo, Solache-Ríos, Gómez-Espinosa y García-Gaitán [11], quienes apreciaron el desplazamiento de las bandas principales características del quitosano debido a la adsorción de Cu y Zn. Así también, el espectro IR quitosano con aluminio muestra una depresión de la banda característica del grupo C–H a 2910 cm^{-1}, la cual puede atribuirse a una ecualización de la intensidad por la formación del complejo quitosano–Al.

Por su parte, la Figura 2 presenta los espectros IR de la cascarilla de arroz sin aluminio (línea continua) y con aluminio (línea discontinua). La comparación espectroscópica de ambos espectros muestra cambios y depresiones en la intensidad de algunas de las principales bandas de adsorción: incremento de la banda a 3450 cm^{-1} debido a los grupo OH presentes en la cascarilla y por la formación del complejo biomasa–Al–OH, depresión de un pico a 2400 cm^{-1} asociado a la formación del complejo, y deformaciones en la serie de bandas de 1600 a 400 cm^{-1}, debido a los enlaces Al–O [10]. Así mismo, ambos espectros muestran una serie de bandas características, entre 1500 y 700 cm^{-1}, que se atribuyen a la celulosa contenida en la cascarilla de arroz [7].

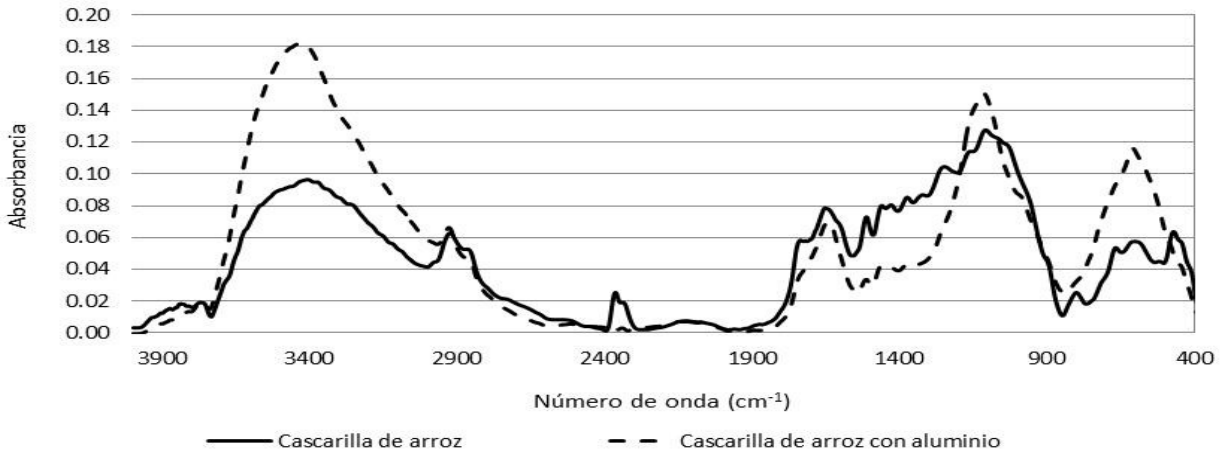


Figura 2. Espectros IR por transformada de Fourier de la cascarilla de arroz sin aluminio y con la adsorción del ion aluminio.

4.2 Efecto del pH inicial en el porcentaje de remoción de aluminio

Los gráficos del porcentaje de remoción del aluminio en quitosano y cascarilla de arroz en función del pH se muestran en la Figura 3. Los resultados muestran que el porcentaje más bajo de remoción de Al(III) fue a pH 4 para ambos adsorbentes; siendo el más bajo en la cascarilla de arroz (15.6%) que en quitosano (73.4%).

El bajo porcentaje de remoción en la cascarilla de arroz puede deberse a la presencia de iones H^+ en la solución que inducen a la protonación de los grupos funcionales ácidos y alcoholes fenilpropílicos [12], y debido a la repulsión electrostática, no permite la interacción con los iones Al^{3+}, presentes en la forma de $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ [13]. En el caso del quitosano, la presencia de los grupos amino protonados (NH_4^+) del quitosano y la especie $[Al(H_2O)_6]^{3+}$ del aluminio en la solución acuosa provocan el bajo porcentaje de remoción, ya que la repulsión electrostática entre ellos, no permiten una máxima interacción entre los iones Al(III) y el adsorbente.

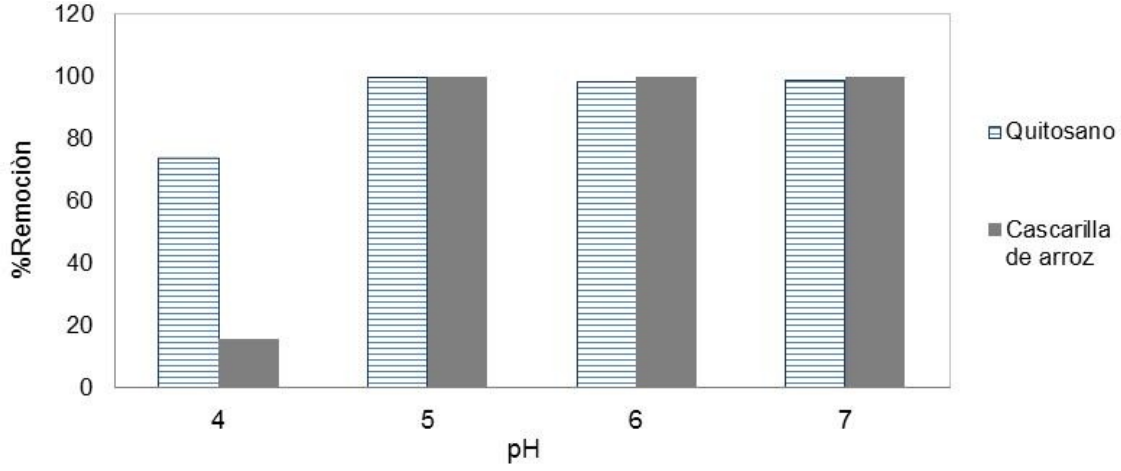


Figura 3. Efecto del pH en el porcentaje de remoción de aluminio en quitosano y en cascarilla de arroz.

Al incrementar el pH, disminuye la concentración de iones H^+ en la solución e incrementa el porcentaje de remoción del aluminio en ambos adsorbentes. De acuerdo a Othman, Abdullah, y Abdul Aziz [14], a pH entre 5 y 7, las especies que predominan de aluminio disuelto son $[Al(OH)2]^+$ y $[Al (OH)4]^-$, las cuales puedan interactuar con los sitios no protonados de ambos adsorbentes ya sea por interacción electrostática o por la formación del complejo ion metálico–adsorbente, vía formación de enlaces de coordinación [13].

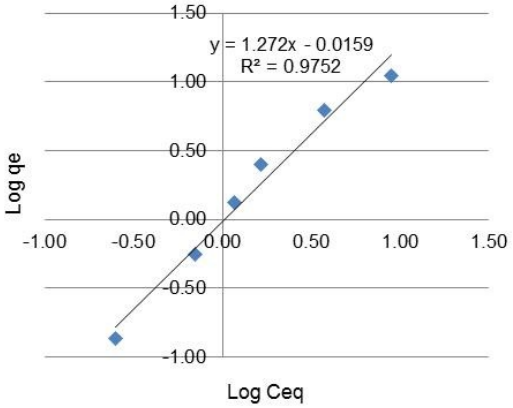
De acuerdo a los gráficos de la Figura 3, los porcentajes más altos de remoción de aluminio (> 98%) se registran a partir de pH 5 para ambos adsorbentes; siendo ligeramente mayor, a pH 5 para el quitosano con un 99.64 %, y a pH 6 para la cascarilla de arroz con un 99.86%.

4.3 Determinación de las isotermas de adsorción de Aluminio

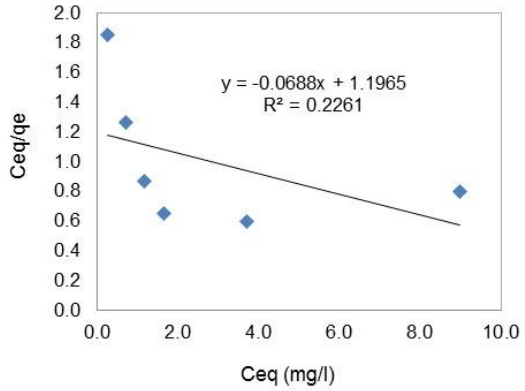
En la Figura 4 se presentan los datos experimentales del equilibrio de adsorción de aluminio en quitosano y cascarilla de arroz ajustados a los modelos linealizados de Freundlich y Langmuir. Estos resultados muestran un buen ajuste de los datos a la isoterma de Freundlich, con un coeficiente de correlación R^2 mayor que 0.97.

Estos resultados indican que el modelo de Freundlich es el que mejor describe la adsorción de aluminio en ambos adsorbentes. Resultados similares fueron obtenidos por Badawi, Negm, Abou kana y Hefni [13], cuyos datos experimentales de la adsorción de aluminio en quitosano-acido tánico tuvieron un mejor ajuste a la isoterma de Freundlich con un R^2 de 0.99. De acuerdo a van Loon y Duffy [15], la ecuación de Freundlich considera que no todos los sitios de adsorción son iguales y predice una adsorción multicapa.

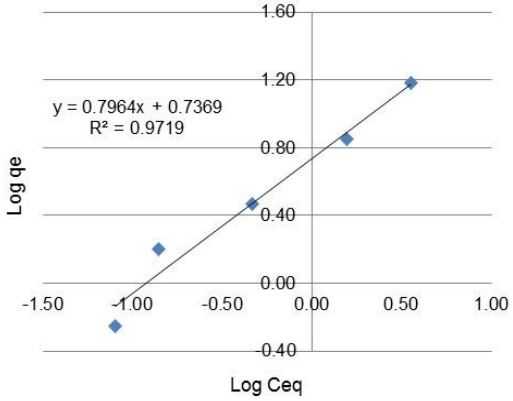
Por otro, el R^2 para el ajuste de los datos experimentales al modelo de Langmuir fue más bajo, lo cual demuestra que si hay interacción entre las moléculas adsorbidas. Para determinar los parámetros de la isoterma de Langmuir (Tabla 1), los datos experimentales del equilibrio de adsorción de Al(III) en quitosano y cascarilla de arroz fueron ajustados al modelo no lineal, utilizando el programa MATLAB. En la Figura 5 se presenta gráficamente el ajuste de los datos.



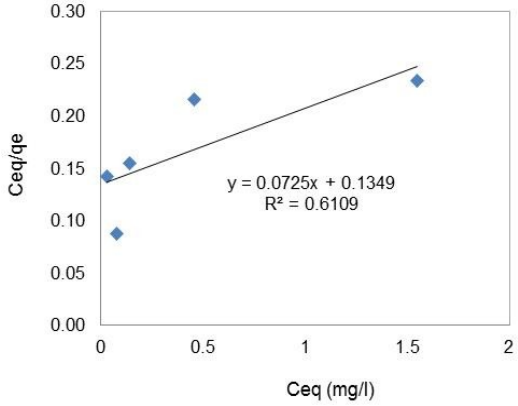
(a) Isoterma de Freundlich de Al(III) en quitosano.



(b) Isoterma de Langmuir de Al(III) en quitosano.

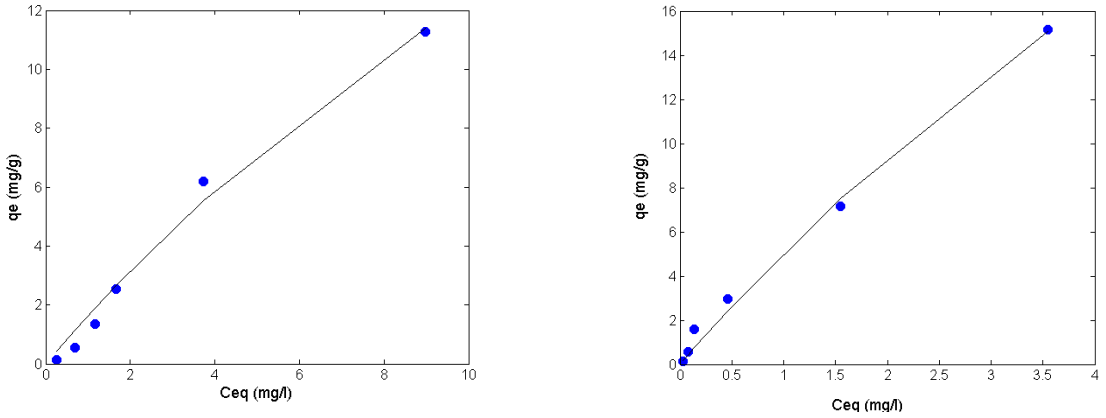


(c) Isoterma de Freundlich de Al(III) en cascarilla de arroz.



(d) Isoterma de Langmuir de Al(III) en cascarilla de arroz.

Figura 4. Isotermas de adsorción de aluminio en quitosano y cascarilla de arroz ajustadas a los modelos linealizados de Freundlich y Langmuir.



(a) (b)

Figura 5. Datos de equilibrio de adsorción de aluminio en (a) quitosano y en (b) cascarilla de arroz ajustadas al modelo no lineal de Langmuir.

Los parámetros obtenidos del modelo de Langmuir indican que la cascarilla de arroz tiene la mayor capacidad de adsorción de aluminio con un $q_{e,max}$ de 69.76 mg/g (Tabla 1). Por su parte, los parámetros del modelo de Freundlich (a_F y b_F) fueron calculados a partir de la ecuación del gráfico de regresión lineal presentado en la Figura 5.a y 5.c.

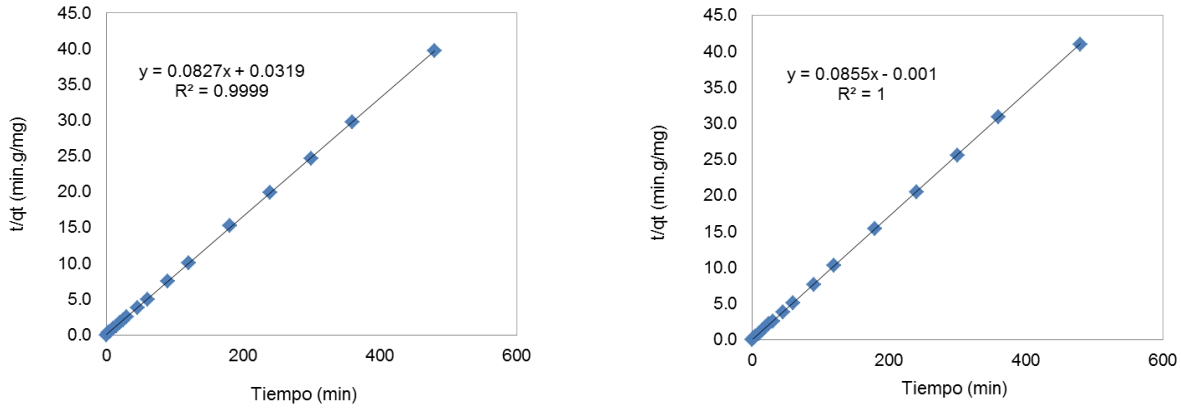
De acuerdo a Badawi, Negm, Abou kana y Hefni [13], altos valores del parámetro empírico adimensional de Freundlich b_F (> 1) indica que hay homogeneidad entre los sitios activos y los iones metálicos adsorbidos en la superficie del adsorbente; lo cual indica, de acuerdo a los resultados obtenidos, que la adsorción de los iones aluminio en los sitios activos fue más homogénea en el quitosano que en la cascarilla de arroz.

Tabla 1. Parámetros de las isotermas de Langmuir y Freundlich para la adsorción de aluminio en quitosano y cascarilla de arroz.

Adsorbente	**Isoterma de Langmuir**		**Isoterma de Freundlich**	
	$q_{e,max}$ (mg/g)	b (l/mg)	a_F ($mg^{1-bF} \cdot L^{bF}/g$)	b_F
Quitosano	45.26	0.0374	0.964	1.272
Cascarilla de Arroz	69.76	0.0777	5.456	0.796

4.4 Cinética de adsorción de Aluminio

Para identificar el mecanismo controlante en la velocidad de adsorción de aluminio en quitosano y en cáscara de arroz, los datos experimentales fueron ajustados a los modelos de pseudo primer orden y pseudo segundo orden. Los resultados mostraron que el modelo de pseudo-segundo orden era el que mejor se ajustaba a los datos experimentales con un coeficiente de correlación R^2 mayor que 0.99 (Figura 6). Estos resultados indican que el paso controlante en el proceso de adsorción del aluminio en ambos bioadsorbentes es la adsorción del ion aluminio en los sitios activos del adsorbente [13].



(a) (b)

Figura 6. Forma linealizada de la ecuación de pseudo segundo orden de la cinética de adsorción de aluminio en (a) quitosano y (b) cascarilla de arroz.

Los parámetros de la ecuación de pseudo-segundo orden: la capacidad de adsorción en el equilibrio (q_e) y la constante de velocidad de pseudo-segundo orden (k_2), calculados a partir de la ecuación del gráfico de regresión lineal presentado en la Figura 6.a y 6.b, se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros cinéticos de la adsorción de aluminio en quitosano y cascarilla de arroz.

Adsorbente	**Pseudo Primer Orden**	**Pseudo Segundo Orden**		
	R^2	**R^2**	**q_e (mg/g)**	**k_2 (g/mg.min)**

Quitosano	0.179	0.999	12.09	0.214
Cascarilla de arroz	0.103	1.000	11.70	7.310

4.5 Aplicación de los bioadsorbentes en agua de consumo

Para este estudio se utilizaron muestras extraídas de tres puntos de muestreo: (i) entrada de una torre con agua cruda proveniente de Puerto Díaz, Lago Cocibolca, (ii) etapa de filtración, después que se le agrega sulfato de aluminio, y (iii) después del proceso de desinfección (agua del grifo). En la Tabla 3 se muestran los parámetros físico-químicos que se realizaron a las diferentes muestras.

Tabla 3. Parámetros físico-químicas de muestras de agua extraída de la planta potabilizadora Isaac Deleo (ENACAL) y agua del grifo.

Parámetro	**Agua Cruda**	**Agua filtrada**	**Agua del grifo**	**Unidades**
pH	7.2	7.2	7.2	–
Temperatura	30.2	30.4	30.0	°C
Concentración de aluminio (mg/l)	< 0.01	< 0.01	< 0.01	mg/l

De acuerdo a los resultados, el contenido de aluminio en las muestras es menor que 0.01 mg/l. No obstante, para comprobar la eficacia de los bioadsorbentes y la interferencia de otros iones en el proceso de adsorción de aluminio, se tomó 50 ml de la muestra del agua filtrada y se le agregó una solución estándar de aluminio hasta obtener una concentración de 20 mg/l en la muestra.

Los resultados, después del proceso de adsorción, mostraron que con el quitosano se obtuvo un porcentaje de remoción de 95.38% y con la cascarilla de arroz fue de un 97.47%. Estos resultados indican que el adsorbente cascarilla de arroz es más efectivo en la remoción de Al(III). Así también, demuestran que el porcentaje de remoción de aluminio en ambos biadsorbentes fue menor en las muestras de agua potable que en las soluciones sintéticas. Esto puede ser debido a la presencia de otros iones metálicos en las aguas naturales que compiten con los iones aluminio por los sitios de adsorción.

5. Conclusiones

El estudio comparativo de la adsorción de aluminio en quitosano y en cascarilla de arroz mostró que el pH de la solución afecta el porcentaje de remoción del ion, siendo éste más alto a pH

mayor que 5. El equilibrio de adsorción del aluminio en ambos bioadsorbentes se ajusta al modelo de la isoterma de Freundlich y según el modelo de Langmuir, la cascarilla de arroz tiene mayor capacidad de adsorción de aluminio que el quitosano. La cinética de adsorción del aluminio en quitosano y en cascarilla de arroz se ajusta al modelo de pseudo segundo orden. Tanto el quitosano como la cascarilla de arroz son efectivos para la remoción de aluminio de agua potable con altos porcentajes de remoción.

6. Bibliografía

1. Pour, G., Takassi, M., Hamoule T. “Aluminium in drinking water: An overview”. Faculty of Engineering, University of Regina, Regina, Canada, 2014.
2. Othman, M. N., Abdullah, M. P., Abdul Aziz, Y. F. “Removal of aluminium from drinking water”. Sains Malaysiana, 39(1), 51–55 (2010).
3. Özkahraman, B. “Synthesis of Ion – Imprinted Bioadsorbents Based on Chitosan and its Usage in Al (III) Removal”. Hitit University, Corum, Turkey, 2017.
4. Moncada, J., Munguía, E. “Evaluación de la calidad del agua potable en cuatro plantas potabilizadoras de la región Boaco – Chontales para el período de tiempo 2003 2007”. Facultad de Ingeniería Química, UNI, Managua, Nicaragua, 2008.
5. Benavente, M. “Adsorption of Metallic Ions onto Chitosan: Equilibrium and Kinetic Studies”. Licentiate Thesis in Chemical Engineering, Royal Institute of Technology (KTH), Stockholm, Sweden, 2008.
6. Ahmaruzzaman, M., Gupta, V. K. “Rice Husk and its ash as Low-Cost Adsorbents in Water and Wastewater Treatment”. Industrial & Engineering Chemistry Research, 50, pp. 13589–13613 (2011).
7. Herrera, G., Hormanza, A., Gallego, D. “Cascarilla de arroz: material alternativo y de bajo costo para el tratamiento de aguas contaminadas con cromo (VI)”. Gestión Ambiental., 14 (1), 73–84 (2011).
8. Rodríguez-Páez, J. E., Villaquirán, C., Cobo, J. “Estudio de la formación de los complejos intermedios durante la síntesis de alúmina”. Materials Research, 4(4), 255–264 (2001).
9. Romero-Sevilla, M., Sánchez-Cuadra, S., Benavente Silva, M. “Aplicación de quitosano modificado en el tratamiento de aguas residuales de tenerías”. Nexo Revista Científica, 31(2), 104-119. doi: 10.5377/nexo.v31i2.6834. (2018).
10. García, G., Falco, M., Sedran, U., Cabrera, S. “Alúminas mesoporosas obtenidas por la ruta de los atranos para su aplicación como matrices en craqueo catalítico”. Revista Boliviana de Química, 27(1), 41–49 (2010).
11. Flores-Alamo, N., Solache-Ríos, M. J., Gómez-Espinosa R. M., García-Gaitán, B. “Estudio de adsorción competitiva de cobre y zinc en solución acuosa utilizando Q/PVA/EGDE”. Revista Mexicana de Ingeniería Química, 14(3), 801–811 (2015).
12. Wade, Jr. L. G. (2004). Química Orgánica. Pearson, Prentice Hall, 5ta. Edición.
13. Badawi, M. A., Negm, N. A., Abou Kana, M. T., Hefni, H. H. “Adsorption of aluminum and lead from wastewater by chitosan-tannic acid modified biopolymers: isotherms, kinetics, thermodynamics and process mechanism”. International Journal of Biological Macromolecules 99, 465–476 (2017).
14. Othman, M. N., Abdullah, M. P., Abdul Aziz, Y. F. “Removal of aluminium from drinking water”. Sains Malaysiana, 39(1), 51–55 (2010).
15. van Loon, G. W., Duffy, S. J. “Environmental Chemistry”. Second Edition. Oxford University Press INc., New York, pp. 318 (2005).

Diseño de una planta recicladora de plásticos de uso agrícola como alternativa para la contaminación en México por estos residuos

Delgado López C. A.[1], Gavilán García I. C.[2].
[1]Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Psicología, Unidad de Gestión de Residuos, Edificio D Cubículo 17 en Mezzanine, Cto. Exterior S/N, C.U. Coyoacán. Ciudad de México, 04510, México.
[2]Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, Unidad de Gestión Ambiental, Edificio "A" Anexo de Laboratorio “D”, Cto. Exterior S/N, C.U. Coyoacán. Ciudad de México, 04510, México.
e-mail: chris_loopz@yahoo.com.mx, irmac@unam.mx.

1. Resumen

La agricultura protegida es una práctica que utiliza plásticos como elementos de protección que controlan factores ambientales, minimizando los impactos que ejercen en los cultivos las condiciones climatológicas adversas y plagas. Derivado de esto, surgió la problemática del abandono de agroplásticos en campos generando la contaminación de suelos agrícolas, aire y agua debido a su quema indiscriminada. El reciclaje es una opción redituable para su manejo y la fabricación de diversos productos, resolviendo la problemática de contaminación que ocasionan. *Objetivo:* Diseñar una planta recicladora de agroplásticos en México con alcance de 3 t/h como alternativa para solucionar el problema de contaminación por este residuo. *Metodología:* Mediante un estudio de mercado y factibilidad económico se diseñó una planta que recicla agroplásticos utilizados en la agricultura protegida. Resultados: De acuerdo con las bases y criterios establecidos, la planta es factible con un periodo corto de recuperación de la inversión.

1. Introducción

Los plásticos agrícolas o agroplásticos son todos los materiales poliméricos utilizados como elementos de protección en la agricultura protegida (figura 1) y como estrategia de adaptación de los cultivos al cambio climático [1].



Figura 1. Agricultura protegida. Fuente: [2].

Estos elementos de protección ejercen determinado grado de control sobre los diversos factores del ambiente, permitiendo con ello minimizar los impactos a cultivos debido a condiciones climáticas adversas y las plagas [3].

Las ventajas de su uso son el ahorro de agua, incremento en la producción total, protección de contingencias meteorológicas, además de un control de plagas, enfermedades y malezas. Sin embargo, los residuos generados son abandonados a la intemperie en los campos y desechados en barrancas y en ocasiones en basureros clandestinos a cielo abierto y en el mejor de los casos depositados en rellenos sanitarios. Su abandono y acumulación en el campo contribuye a la mala imagen que tiene el plástico como “agresor” del ambiente (figura 2), además de la contaminación de los suelos agrícolas y el impacto paisajístico y visual, generando más interés en su disposición final [4].



Figura 2. Valle de San Quintín, Baja California. Fuente: [5].

En un escenario de quema a cielo abierto los plásticos agrícolas se queman fácilmente, pero de forma incompleta. La combustión incompleta puede dar lugar a la liberación de materia en partículas como monóxido de carbono, dióxido de azufre y otros contaminantes del aire. Además, subproductos peligrosos pueden estar presentes en la ceniza residual y en las emisiones en el aire en forma de metales pesados, dioxinas y furanos. Las emisiones de mayor preocupación durante la quema al aire libre de los plásticos agrícolas son, probablemente, las dioxinas y los furanos, que se forman sobre todo en los casos de las temperaturas de combustión bajas (asociadas con la quema a cielo abierto) [6, 7].

Las dioxinas y los furanos son un problema para la salud, incluso en muy pequeñas cantidades, y se asocian con alteraciones endocrinas, enfermedades del corazón y discapacidades cognitivas y motoras, además de ser un carcinógeno humano conocido. Los seres humanos pueden estar expuestos a las dioxinas directamente por la inhalación o a través de la piel, o por medio de plantas o carne, ya que se concentran en la grasa animal. Esto sugiere que la quema de plásticos agrícolas y la generación de dioxinas asociada es especialmente preocupante, ya que esta práctica ocurre en o cerca de las tierras agrícolas activas. Además, la mayor parte de la ingesta de dioxinas por los seres humanos proviene de fuentes alimenticias, las emisiones de dioxinas provenientes de la quema de plásticos agrícolas tienen el potencial de afectar a la población cuando aterrizan en cultivos y se concentran en los cuerpos de los animales de granja [6, 7].

Otro grupo de contaminantes de interés emitido por la quema de residuos plásticos agrícolas son los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP o PAH, siglas en inglés). Los HAP son considerados contaminantes que tienen un efecto potencial extendido sobre el medio ambiente [7].

En el año 2013 se reportó una generación de 280,000 t de residuos agroplásticos en México. Solo se recicló el 10% y en los últimos años su uso ha tenido un crecimiento de más del 20% anual [4]. La figura 3 ejemplifica la proyección de cantidades generadas para años posteriores:

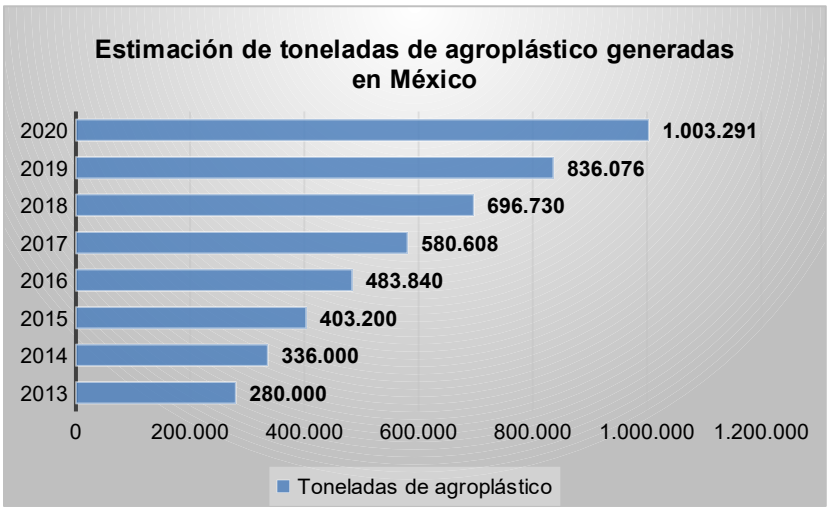


Figura 3. Proyección de la producción de agroplásticos en México. Fuente: [8].

Las consecuencias del abandono de los residuos plásticos agrícolas en los campos y sobrecarga de rellenos sanitarios, la contaminación de aire, suelos y del mar (amenazando a los organismos marinos por fragmentos degradados), hacen evidente la urgente falta de nuevas alternativas de disposición para estos desechos [8].

El ciclo de vida de los diversos productos agroplásticos comprende el proceso de transformación, distribución, almacenamiento, aplicación de producto y reutilización antes de que sean considerados como desechos sólidos. Es importante señalar que

cada producto tiene un ciclo de vida diferente, por lo que varía su incorporación al rubro de material reciclable y ocurre en momentos diferentes del ciclo agrícola [8].

La Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011 clasifica como residuos de manejo especial a los residuos plásticos generados por las actividades agrícolas; sin embargo, en diversas regiones del país no son dispuestos como establece la norma [9].

2. Metodología

Primeramente, se ubicaron geográficamente los centros de acopio de los plásticos agrícolas en México. Estos centros ayudan a la estancia temporal de los plásticos agrícolas donde se reportan las cantidades, se compactan y empacan para su distribución a la planta recicladora, los cuales son administrados por la Asociación Mexicana para el Manejo Integral Ambiental de los Plásticos para uso Agrícola y entidades gubernamentales como la SEMARNAT.

Después, se localizaron las plantas recicladoras de plásticos agrícolas existentes en la actualidad en México. De las aproximadamente 150 empresas recicladoras que operan en México, actualmente solo 13 están dedicadas específicamente a productos agroplásticos, las cuales procesan apenas el 10% de estos residuos (tabla 1).

Tabla 1. Empresas activas en el reciclaje de agroplásticos en México. Fuente: Modificada de [8].

Empresa	***Localización***
Reciclados y Servicios del Noroeste, S.A. de C.V. Reynosa	Reynosa, Tamaulipas
Recicladora Campo Limpio	Guadalajara, Jalisco
Recicladora de Plástico de Celaya, S.A. de C.V.	Celaya, Guanajuato
Campo Limpio Amocali, A.C.	México, CDMX
Prestadores de Servicios Ecológicos, S.A. de C.V.	Puebla, Puebla
Grupo Ibanava, S.A. de C.V.	Tecomán, Colima
Tecnorec	Guadalajara, Jalisco
Plásticos Jaliscienses, S.A. de C.V.	Colima, Colima
Horticultura El Palomo	Actopan, Hidalgo
Ecotecnia	Zapopan, Jalisco
Biocasas Inteligentes	México, CDMX
Invertúneles	Zamora, Michoacán
Juan Hernández Salas	-

Se realizó el estudio de mercado y de factibilidad económica, para posteriormente seleccionar el sitio más óptimo para ubicar la planta recicladora, considerando los estados con mayor potencial de acuerdo con la actividad agrícola con técnicas de agricultura protegida (tabla 2). La ubicación de plantas recicladoras y

centros de acopio en el país complementó la información para la localización de la planta.

Tabla 2. Estudio de la generación de agroplásticos por el Centro de Investigaciones en Química Aplicada (CIQA) del 2008-2010 [5].

Estado	Superficie con Agricultura Protegida (Ha)	Residuos agroplásticos generados/año (t)
Jalisco	12,034	5,155.6
Baja California	34,200	13,108.4
Baja California Sur	10,570	4,434.2
Guanajuato	805.5	2,091.43
Estado de México	2,765	3,066.9
Sinaloa	31,480	10,513.6
Chiapas	1,713.36	3,604.35
Michoacán	7,217.39	4,541.02
Puebla	491.65	582.39
Sonora	2,233.35	1,135.66
Zacatecas	1,992.85	1,424.08
TOTAL	**94,933.6**	**49,657.63**

Finalmente, se diseñó una planta que permita el reciclaje de plásticos agrícolas, incluyendo su recolección, su traslado a la planta y el proceso dentro de las instalaciones como separación, lavado, secado, molido, peletizado y extruido. La ubicación de la planta fue elegida considerando las bases y criterios de diseño, condiciones climatológicas estables, el estudio general de mercado y de factibilidad económica.

3. Resultados y discusión

4.1. Estudio de mercado

Para el estudio de mercado se seleccionó el estado de Jalisco por ser un generador promedio de agroplásticos que nos brinda estabilidad y no sobreproducción de acuerdo con el alcance de la planta recicladora. Además, se encuentra en una región con gran actividad agrícola donde utilizan agroplásticos en diversos rubros, por lo que la generación de residuos justifica una planta recicladora en este estado (tabla 3):

Tabla 3. Desechos plásticos generados en el estado de Jalisco por uso agrícola. Fuente: [4].

Rubro de utilización	t/año
Plástico de cubierta para invernaderos	1,200.0
Plástico para acolchado de suelo	2,200.0
Cintilla de riego por goteo	1,350.0
Plástico para túnel alto	180.5
Bolsas para cultivo de invernadero	46.4
Rafia	140.0
Malla sombra	38.7

TOTAL	5,155.6

4.2. Estudio económico de factibilidad

En la tabla 4 se puede apreciar el precio de los equipos requeridos para la instalación de una planta recicladora de agroplásticos con alcance de 3 t/h, así como el precio de algunos materiales de tubería, costos de instalación y el precio de referencia de una nave seleccionada en la región de Tlaquepaque, Jalisco.

Tabla 4. Costos de equipos y total de inversión fija. Fuente: Mediante la cotización de diversas empresas y distribuidoras.

Lista de equipos para la planta recicladora de agroplásticos			
Cantidad	**Descripción**	**Precio unitario (MXN)**	**Precio Total (MXN)**
1	Banda clasificadora. Modelo BI-101 (10x1)m.	$180,000	$180,000
1	Banda alimentadora. Modelo BG2-3.6 (3.6x0.6x2.1)m.	$55,000	$55,000
1	Molino. Modelo ML500-G3 (1.5x1.9x2.2)m.	$350,000	$350,000
1	Lavadora. Modelo LSI-1000 con secadora incluida (3.5x23x3)m.	$3,915,000	$3,915,000
3	Válvulas Check de bronce	$4,818	$14,454
50	Metros de tubería de acero al carbón de ¾"	$220	$11,000
30	Metros de tubería de acero al carbón de 1.5"	$320	$9,600
1	Tanque de agua con capacidad de 20 m3 (3m dx3m h).	$24,000	$24,000
	Total de equipos		$4,559,054
3,500	Metros cuadrados de construcción	$1,280	$4,480,000
	Costo de instalación (por regla heurística 10% del precio de equipos).		$448,000
	Total de inversión fija		**$9,487,054**

Los costos son de referencia con fines presupuestales, sin embargo, pueden variar según el proveedor al que se acuda. También se consideraron los costos por día de operación de servicios auxiliares (energía eléctrica, agua y gas) y del capital humano de acuerdo con datos de la Comisión Nacional de Salarios Mínimos para una planta que operará 300 días al año [10].

A continuación, se presenta en la tabla 5 el estudio de factibilidad económico general realizado por la Asociación de Recicladores de Plásticos Agrícolas de México (ARPAM) con base en la inversión fija y costos por día de operación para la planta recicladora de agroplásticos con un alcance de 3 t/h con operatividad de 300 días anuales:

TABLA 1. ESTUDIO ECONÓMICO GENERAL DE FACTIBILIDAD [4].

	t/hora	**t/día**	**t/año**
PRODUCCIÓN	3	48	14,400
Costo acopio (6 pesos/Kg)	18,000	288,000	86,400,000
Costo reciclaje (9 pesos/Kg)	27,000	432,000	129,600,000
COSTO TOTAL (pesos)	45,000	720,000	216,000,000
Precio de venta	60,000	960,000	288,000,000
UTILIDAD	15,000	240,000	72,000,000
INVERSIÓN	70,000,000		
UTILIDAD MENSUAL	6,000,000		

Tiempo de Recuperación de la inversión	**1 año**		

Considerando los precios estándar del plástico reciclado de la página oficial de Reciclados de México [11], se tomó un precio de referencia de 20 MXN por kilogramo de polietileno de alta densidad (HDPE), es decir, 20,000 MXN por tonelada de plástico reciclado. Lo anterior con la finalidad de presentar un estimado de costos y ventas para una planta recicladora de agroplásticos con alcance de 3 Ton/h (tabla 6):

Tabla 6. Análisis de precio y costo anualmente.

Toneladas de plástico/día	**48**
Venta/día (MXN)	960,000
Ventas anuales (MXN)	288,000,000
Días laborales	300
Costo por Kg de plástico (MXN)	15
Costo del producto/año (MXN)	216,000,000
Utilidad bruta anual (MXN)	72,000,000

Siendo:

- *Ventas/día= Toneladas por día * Precio sugerido*
- *Utilidad bruta anual= Ventas anuales – Costo anual del producto*

Proponiendo una inversión total aproximada de 70,000,000 MXN, el establecimiento de esta planta recicladora de plásticos agrícolas sería rentable hasta el primer año ya que la producción anual representa 72,000,000 MXN y en el primer año se recuperaría la inversión completa.

Mediante el cálculo de la rentabilidad sobre la inversión (RSI) obtenemos un factor mayor a 1, lo que nos indica que, considerando esta inversión, costo y ventas anuales, es factible y el periodo de recuperación de la inversión es corto y conveniente [12].

$$(RSI) = \frac{Utilidad\ anual}{Inversion\ total} = \frac{72{,}000{,}000\ MXN}{70{,}000{,}000\ MXN} = 1.028 \qquad (1)$$

Se debe considerar que el estudio de factibilidad puede variar dependiendo del lugar donde se pueda establecer una planta de este tipo, así como de las condiciones de la planta y de todas las consideraciones que se presentan en esta propuesta. Sin embargo, ayuda a tener una idea general de lo necesario y las implicaciones para realizar dicho proyecto.

4.3. Diseño de la planta recicladora de agroplásticos

El balance de materia es sencillo pues no existe una transformación química durante todo el proceso, por lo que se simplificará de la siguiente manera:

$$Entrada - Salida = Acumulación - Generación \qquad (2)$$

No hay termino de generación pues es una planta recicladora donde todo el material que entra solo modifica su forma. Tampoco tenemos termino de acumulación de materia ya que antes de que la materia prima entre al primer equipo, que es el molino M-01, en la banda trasportadora ya se realizó la revisión de plásticos donde se eliminará la materia prima que no está en buenas condiciones para el proceso de reciclado o material extraño que no sea plástico, por lo que el balance se simplifica de la siguiente manera:

$$ENTRADA - SALIDA = 0 \qquad (3)$$

$$ENTRADA = SALIDA \qquad (4)$$

El balance anterior representa que toda la materia que entra al primer equipo es la que va a salir como producto final, con forma de pellets para la fabricación de otros productos plásticos. El flujo de material plástico será de 3 t/h en todos los puntos del proceso: seleccionado, lavado, secado, molido, peletizado y extruido.

4.4. Diagrama de Flujo del Proceso (DFP), Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) y Plot Plan

A continuación, se presenta el diseño de la planta mediante el desarrollo del Diagrama de Flujo del Proceso (DFP), el Diagrama de Tuberías e Instrumentación (DTI) y el Plot Plan, que describen el proceso y la distribución de las instalaciones para la planta recicladora de agroplásticos en Tlaquepaque, Jalisco, en México (figura 4, 5 y 6):

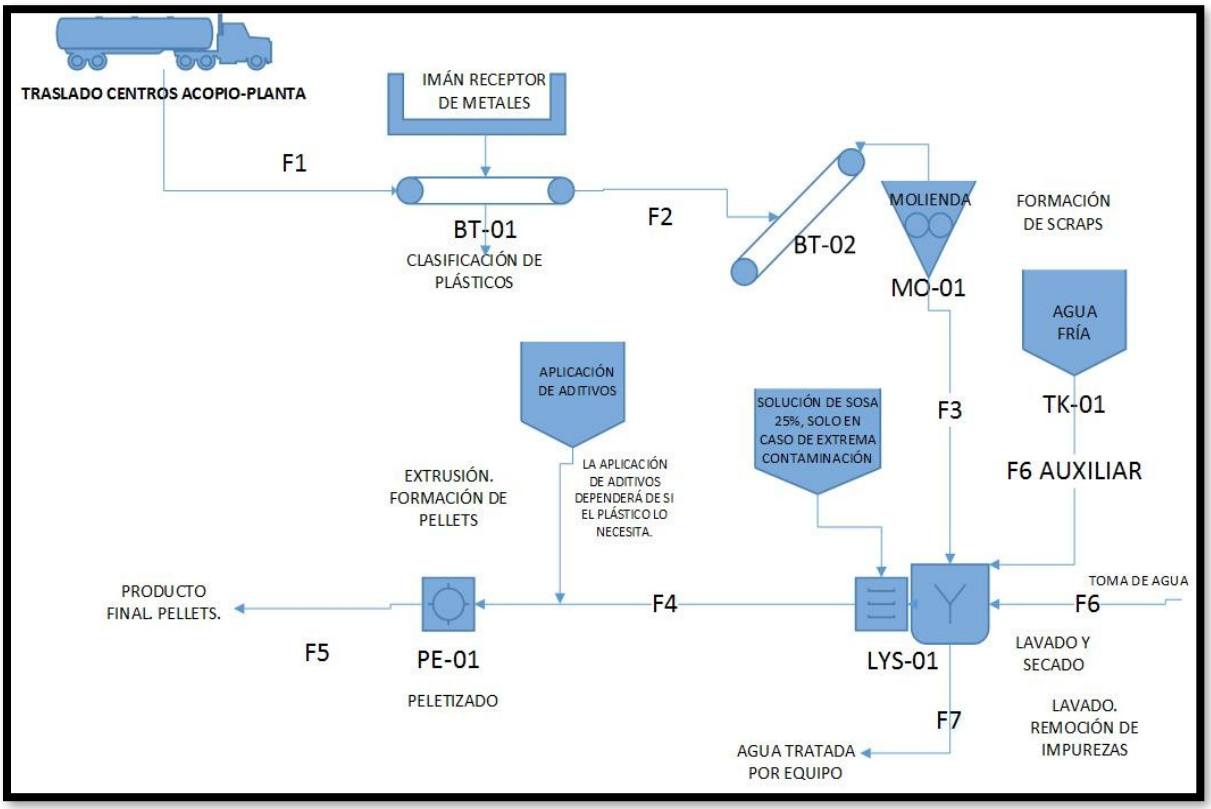


Figura 4. Diagrama de Flujo del Proceso (DFP) del reciclaje de agroplásticos.

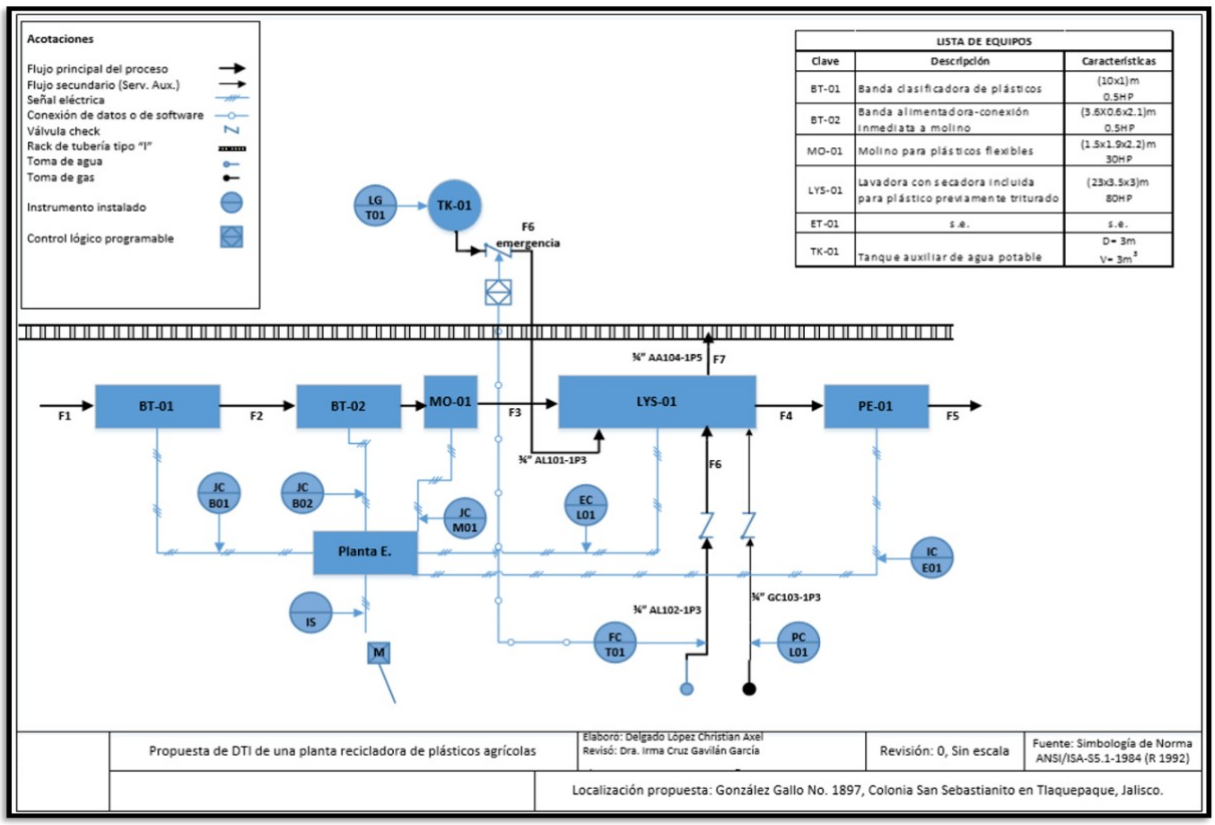


Figura 5. Diagrama de Tubería e Instrumentación (DTI) de la planta recicladora de agroplásticos.

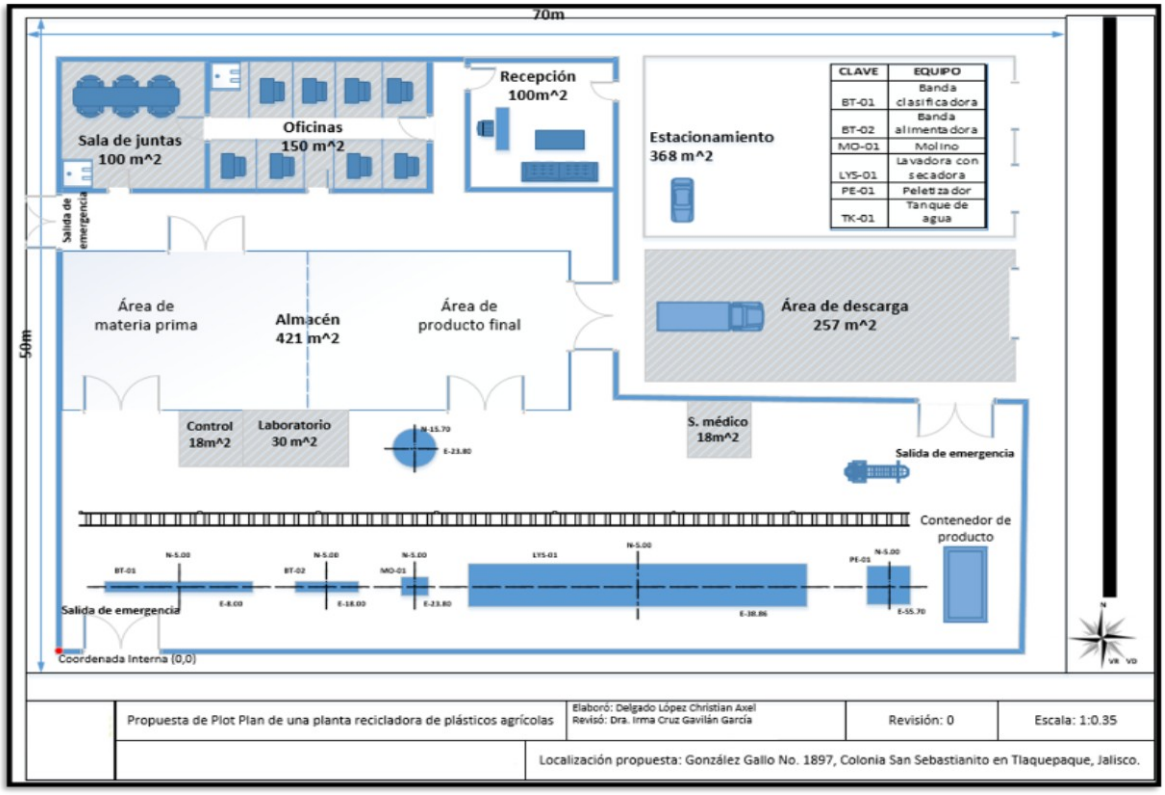


Figura 6. Plot Plan de la planta recicladora de agroplasticos.

4. Conclusiones

Se diseñó una Planta Recicladora de Plásticos Agrícolas con un alcance de 3 t/h para procesar diferentes tipos de plásticos que se utilizan en la agricultura protegida en diversos cultivos a lo largo de la república mexicana. Se terminó el diseño de la ingeniería del proyecto basándose en residuos de película de polietileno de alta densidad (LDPE) y tomando en cuenta las bases y criterios de diseño de equipos y maquinaria requerida para el proceso, así como de la instrumentación y tuberías, sin dejar de lado el cumplimiento de la normatividad vigente en materia de seguridad e higiene y normas ambientales. Finalmente, se concluye que la planta de reciclaje propuesta presenta una gran factibilidad económica, ya que la inversión puede ser recuperada aproximadamente en un año si se respetan los criterios de alimentación y producción establecidos, teniendo una buena utilidad mensual.

El disponer de una planta recicladora de agroplásticos constituye una contribución al problema de quema indiscriminada, con su consecuente efecto de contaminación atmosférica, además de brindar la oportunidad de generar empleos y desarrollo económico en la región.

6. Perspectivas a futuro

La Asociación de Recicladores de Plásticos Agrícolas de México (ARPAM) continúa trabajando y realizando estudios para la ubicación de diversas plantas recicladoras de agroplásticos en toda la república mexicana, los cuales harán llegar a las autoridades competentes con las que trabajan en conjunto. Este es un inicio para diversos puntos estratégicos de recolección y reciclaje de residuos agroplásticos. Las autoridades e instituciones responsables continúan con estudios que permiten a los empresarios e investigadores contribuir con esta labor y dar soluciones a la problemática actual con planes de manejo y nuevas técnicas de disposición de materiales agroplásticos.

7. Referencias

[1] SAGARPA. (2015). *Plan de manejo de residuos generados en actividades agríolas. Primera etapa: Diagnóstico Nacional.* Zacatecas: Reporte detallado, Folio: 211PP064. Recuperado de: https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/346978/Manejo_de_residuos_Detallado.pdf.

[2] Imagen recuperada de: https://www.tecnologiahorticola.com/plastico-biodegradable-acolchado/.

[3] SAGARPA. (2012). *Agricultura protegida 2012.* Recuperado el 15 de julio de 2014 de: http://2006-2012.sagarpa.gob.mx/agricultura/Paginas/Agricultura-Protegida2012.aspx.

[4] Gómez G. (2015, 11 de abril). Plan de Manejo. Reciclado de plásticos agrícolas. *TecnoAgro*, Recuperado de: https://tecnoagro.com.mx/no.-99/plan-de-manejo-reciclado-de-plasticos-agricolas

[5] López, L. A., y SEMARNAT. (2012). Los residuos de la producción primaria (agropecuarios y pesqueros). En L. A. López (Presidencia), *Simposio Internacional de Residuos: Perspectiva y gestión del sector primario en México (2008-2012).* Simposio llevado a cabo en México.

[6] Sonnevera International Corporation. (2011). *Ontario agricultural waste study: Environmental impacts of open-burning agricultural plástics*. Recuperado de: http://www.cleanfarms.ca/documents/studies/AgPlasticEnviroImpact

[7] Briassoulis, D. et al. (2013). Review, mapping and analysis of the agricultural plastic waste generation and consolidation in Europe*;. Waste, Management and Research*. 31(12), 1262 –1278.

[8] Delgado López, C., Gavilán García, I., y Fernández Villagómez, G. (2020). *Estudio de agroplásticos en la agricultura protegida mexicana.* CDMX: Editorial Académica Española (EAE).

[9] DOF. (2011). *Norma Oficial Mexicana NOM-161-SEMARNAT-2011-Residuos de manejo especial.* CDMX: Diario Oficial de la Federación.

[10] CONASAMI. (enero de 2020). *Comisión Nacional de los Salarios Mínimos*. Recuperado de http://www.conasami.gob.mx/consulta.html.

[11] RECIMEX. (diciembre de 2019). *RECIMEX*. Recuperado de http://www.recimex.com.mx/index.php

[12] Anaya, A., Barragán, R., y Vergara, A. (2013). *Manual de temas selectos de ingeniería de proyectos.* Ciudad de México: UNAM.

Plan integral para la gestión de residuos peligrosos en la Facultad de Medicina de la UNAM

Arce Camacho Ma. Isabel,[1,] Mora Barrera Laura Itzel,[2] Gutierrez Lara María Rafaela[3]

[1]UNAM, Facultad de Medicina, División de Investigación, Departamento Gestión de Bioseguridad.

[2] UNAM, Facultad de Medicina, División de Investigación, Departamento Gestión de Bioseguridad.

[3] UNAM, Facultad de Química, Departamento Ingeniería Química.

arcecamacho@yahoo.com.mx

lauix_best@hotmail.com

rafaelag@unam.mx

1. Resumen

La Facultad de Medicina de la UNAM cuenta con plan integral en materia de gestión de residuos peligrosos, el cual está a cargo del Departamento de Gestión de Bioseguridad, quien se encarga de solicitar, recolectar, supervisar y entregar los residuos peligrosos generados por esta institución educativa, esto a través de colectas donde se reciben, clasifican y acondicionan a los residuos peligrosos generados, para posteriormente darles una disposición final a través de una empresa certificada ante SEMARNAT en materia de recolección de residuos peligrosos.

En este trabajo se ejemplifica a detalle el plan integral para la gestión de residuos peligrosos y se mencionan los alcances de dicho plan al obtener una cuantificación anual de los residuos puestos a disposición, en el año 2019, se recolectaron 9258.1Kg de Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos, 927.3 L y 2332.3 Kg de residuos peligrosos químicos y 38.25m³ de residuos de manejo especial

2. Introducción

La Facultad de Medicina cuenta con un plan integral para la gestión de residuos peligrosos, como principal punto de abordaje, se comienza con una clasificación de los residuos en tres importantes grupos, los grupos en los que se clasifican los residuos son los siguientes: Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos (RPBI), residuos químicos, residuos de manejo especial.

Los Residuos Peligrosos Biológico-Infecciosos (RPBI), son aquellos materiales generados durante los servicios de atención médica que contengan agentes biológico-infecciosos según son definidos en la NOM-087-SEMARNAT-2002, y que puedan causar efectos nocivos a la salud y al ambiente. Se clasifican en sangre, cepas y cultivos, patológicos, no anatómicos, punzocortantes

- **Sangre:** La sangre y los componentes de ésta, sólo en su forma líquida, así como los derivados no comerciales, incluyendo las células progenitoras, hematopoyéticas y las fracciones celulares o acelulares de la sangre resultante (hemoderivados). [7]
- **Cepas y cultivos:** Los cultivos generados en los procedimientos de diagnóstico e investigación, así como los generados en la producción y control de agentes biológico-infecciosos. Utensilios desechables usados para contener, transferir, inocular y mezclar cultivos de agentes biológico- infecciosos. [8]

- **Patológicos:** Los tejidos, órganos, cadáveres y partes de animales que fueron inoculados como aves (pollos, palomas), roedores (ratas, ratones), anfibios crustáceos, cobayos, conejos y todo animal utilizado como modelo experimental. [9]
- **No anatómicos:** Todo material desechable contaminado con RPBI como torundas, gasas, guantes, cubrebocas, hisopos, tubos de muestra, líquido sinovial, líquido pericárdico, líquido pleural, líquido céfalo-raquídeo, líquido peritoneal, esputo o secreciones. [10]
- **Punzocortantes:** Los que han estado en contacto con humanos o animales o sus muestras biológicas. Únicamente: tubos capilares, navajas, lancetas, agujas de jeringas, agujas hipodérmicas, agujas de suturas, agujas de acupuntura, agujas para tatuajes, hojas de bisturí, estiletes de catéter, cubreobjetos, portaobjetos. [11]

El siguiente grupo en el que se clasifican los residuos dentro de la Facultad de Medicina, es el de los residuos químicos, los cuales se encuentran definidos en la NOM-052-SEMARNAT-2005 como todos aquellos materiales que, por sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas e inflamables, representan un peligro para la salud humana y el ambiente, cuando son manejados o dispuestos en forma inadecuada. Los residuos químicos a su vez son clasificados de acuerdo con sus propiedades y características, dentro del primer filtro para su clasificación es su estado de la materia, y el segundo en con base en sus características corrosivas, reactivas, explosivas, tóxicas e inflamables. La identificación de residuos peligrosos de tipo químico es el proceso mediante el cual se reconoce que una sustancia ha perdido sus características intrínsecas, sus propiedades han dejado de ser útiles para el usuario o se encuentran fuera de especificaciones o caducas; dichas sustancias químicas carecen o presentan variación en las características necesarias para ser utilizadas, por lo que se deben manejar como residuo con "características peligrosas".

---

[7] NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002

[8] NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002

[9] NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002

[10] NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002

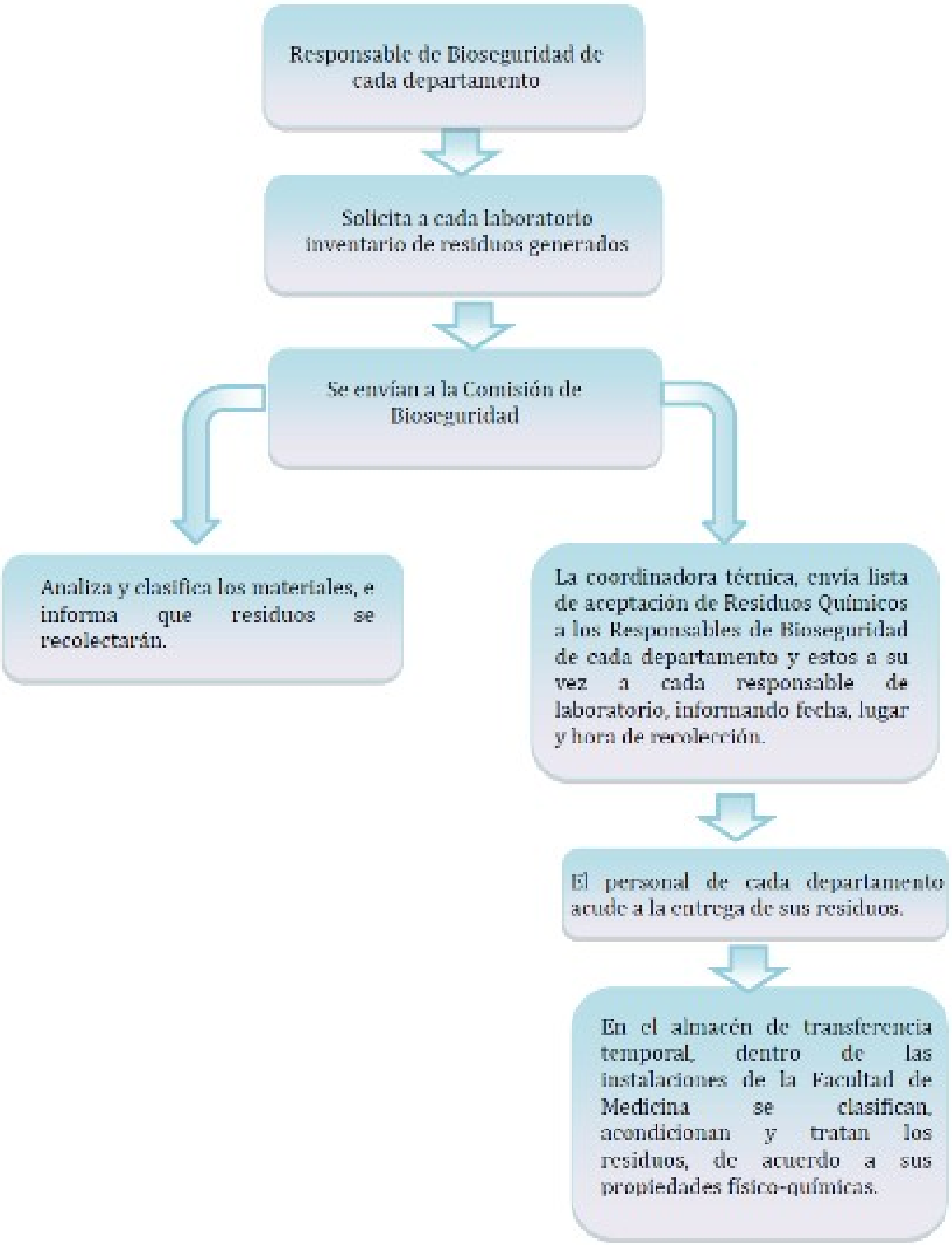
[11] NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002

El último rubro corresponde a los residuos de manejo especial, estos son aquellos que no están contaminados con agentes biológicos o químicos, pero que han sido empleados en labores de atención médica o investigación.

3. Condiciones experimentales

El proceso para la gestión de los residuos peligrosos consta de tres etapas, en cada una de ellas se realizan diferentes actividades para la gestión integral de los residuos peligrosos.

La primera etapa se inicia con una evaluación e inventario de los residuos que tienen los diferentes departamentos de la Facultad para identificar la situación actual y establecer las medidas correctivas necesarias para cumplir con la normatividad establecida en la NOM-052-SEMARNAT-2005, NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, es importante mencionar que para que la Comisión de Bioseguridad reciba el inventario, es necesario realizar el siguiente procedimiento, el cual se encuentra en la **Figura 1.**



[12]

[12] Manual de procedimientos para el manejo, tratamiento y disposición de residuos peligrosos. UNAM



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA
DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA

DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN
COMISIÓN DE BIOSEGURIDAD

RESIDUO PUNZOCORTANTE, BIOLÓGICO INFECCIOSO

Departamento: _____ Responsable: _____

Laboratorio: _____ Fecha: _____

Tipo de residuo[1]	Descripción[2]	Cantidad[3] (K, g)	Tipo de envase[4]

[1] Residuo: AGUJAS, HOJAS DE BISTURÍ

[2] Descripción: Señalar tipo de contenedor, condiciones del mismo etc.
[3] Peso aproximado.
[4] Tipo de envase: Señalar si es vidrio, plástico, lata, caja, bolsa, etc.

DIVISIÓN de INVESTIGACIÓN FACULTAD DE MEDICINA UNAM

[13]

Figura 2. ***Solicitud para recolección de residuos peligrosos biológico-***

[13] Manual de procedimientos para el manejo, tratamiento y disposición de residuos peligrosos. UNAM

FM/CB/001/16

Facultad de Medicina

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA

DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN
COMISIÓN DE BIOSEGURIDAD

SOLICITUD DE RESIDUOS QUIMICOS EXISTENTES

Departamento: _____ Fecha: _____

Laboratorio: _____ Responsable: _____

Tipo de residuo[1]	Composición (%, concentración, medio de disolución, etc.)	Cantidad[2] (L, g)	Tipo de envase[3]

[1] Residuo: No corresponde a reactivos en uso ni a los almacenados.
[2] Cantidad: Especificar volumen o peso aproximado.
[3] Tipo de envase: Señalar si es vidrio, plástico, lata, caja, bolsa, etc.

DIVISIÓN de INVESTIGACIÓN FACULTAD DE MEDICINA UNAM

[14]

[14] Manual de procedimientos para el manejo, tratamiento y disposición de residuos peligrosos. UNAM

Figura 3. ***Solicitud para recolección de residuos químicos***

La segunda etapa, inicia una vez que se recibe el inventario, y se da inicio al proceso de la clasificación, cuantificación, registro y control de los diferentes residuos generados por área, con la finalidad de establecer el tratamiento y la disposición final de cada residuo.

El siguiente paso es notificar que residuos se les aceptará en la recolecta, esto de acuerdo con sus características fisicoquímicas, y se les notificará mediante el formato de aceptación, el cual se les envía vía electrónica y contiene toda la información relacionada con el día de la entrega, dicho formato se muestra en la **Figura 5.** todos los residuos deben estar correctamente clasificados y etiquetados, de acuerdo con el diagrama presentado en la **Figura 4**.



[15]

Figura 4. ***Diagrama de separación de residuos químicos.***

La tercera etapa inicia una vez recibidos los residuos, se realiza el proceso de clasificación dentro de la caseta temporal para los residuos peligrosos, en este lugar se llevará a cabo el tratamiento y

[15] Manual de procedimientos para el manejo, tratamiento y disposición de residuos peligrosos. UNAM

acondicionamiento de acuerdo a sus características fisicoquímicas para su disposición final a través de una empresa certificada en materia de manejo de residuos peligrosos.

En la implementación de la metodología utilizada para el manejo adecuado de los diferentes residuos peligrosos químicos, biológicos y de manejo especial se consideraron los lineamientos establecidos en: NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002, NOM-052-SEMARNAT-2005, NOM-054-SEMARNAT-1993.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
FACULTAD DE MEDICINA

DIVISIÓN DE INVESTIGACIÓN
COMISIÓN DE BIOSEGURIDAD

RESIDUO QUÍMICO

Departamento:_____ **Responsable:** _____

Laboratorio: _____ **Fecha:** _____

Tipo de residuo[1]	Composición (%, concentración, medio de disolución, etc.)	Cantidad (L, g)[2]	Tipo de envase[3]

[1] Residuo: No corresponde a reactivos en uso ni a los almacenados.
[2] Cantidad: Especificar volumen o peso aproximado.
[3] Tipo de envase: Señalar si es vidrio, plástico, lata, caja, bolsa, etc.

[16]

Figura 5. Formato de aceptación de los residuos peligrosos.

[16] Manual de procedimientos para el manejo, tratamiento y disposición de residuos peligrosos. UNAM

4. Resultados y discusión

De acuerdo con la clasificación realizada se obtuvieron los siguientes datos para el caso de los residuos biológico-infecciosos, químicos y especiales en el año 2019.

42 colectas			
Patológicos	No anatómicos	Cepas y cultivos	Punzocortantes
4989.4	2170.4	1804.2	248.5
Total: 9258.1Kg			

Tabla 1. Datos obtenidos del Plan integral de gestión de residuos peligrosos para los RPBI.

Tabla 2. Datos obtenidos del Plan integral de gestión de residuos peligrosos para los residuos químicos.

RESIDUOS	**Primera recolecta**	**Segunda Recolecta**	**Tercera Recolecta**	**Cuarta Recolecta**	**Total**

Residuos de Manejo Especial	Recolectas		Cantidad (m³)		
DISOLVENTES HALOGENADOS (L)	5		10	8.75	23.75
ENVASES CONTAMINADOS (Kg)	132	82.25	100.7	111.15	426.1
SOLIDOS ORGÁNICOS (kg)	21	38.25			
	50.6	39.5	55.85	77.6	223.55
DISOLVENTES NO HALOGENADOS (L)	113	175	203	40	531
BROMURO DE ETIDIO (L)	20	5	50.25	33.3	108.55
ÁCIDOS CON TRAZAS DE METAL (L)	44			5	49
MEZCLA DE ÁCIDOS (L)			10		10
REVELADOR (L)	20	5	50	10	85
FIJADOR (L)			20		20
SOLIDOS INORGÁNICOS (kg)		13.55		5.85	19.4
QUÍMICOS CADUCOS (kg)	56.5	13.25	38.7	54.5	162.95
MEZCLA DE METALES			5	3.75	8.75
MEZCLA DE ALCALINOS (L)		8.75	20	20	48.75
TERMÓMETROS (Pza)			4		4
MERCURIO (g)			0.3		0.3
CROMO EN SOLUCIÓN ÁCIDA (L)	5			5	10
Total:	**927.3 L**	**2332.3 Kg**			

Tabla 1. Datos obtenidos del Plan integral de gestión de residuos peligrosos para los residuos de manejo especial.

5. Conclusiones

La generación de residuos peligrosos actualmente es un problema general ya que una disposición inadecuada de los mismos genera daños a la salud a y al medio ambiente una implementación de un programa de gestión ambiental y la concientización de investigadores, alumnos y todo personal que participa en el programa ayudara a garantizar el buen manejo, tratamiento, disposición final y la bioseguridad de toda la comunidad de la Facultad

6. Bibliografía

1. Hamed Farrokhi-Asl, Ahmad Makui, Rouzbeh Ghousi, Masoud Rabbani? Developing a hazardous waste management system with consideration of health, safety, and environment. Computers & Electrical Engineering, 82, 2020. 106553.
2. - Yahya Safari, Kamaladdin Karimyan, Vinod Kumar Gupta, Arash Ziapour, Hooshmand Sharafi. A study of staff's awareness and attitudes towards the importance of household hazardous wastes (HHW) management (A Case Study of Kermanshah University of Medical Sciences, Kermanshah, Iran). Data in Brief, 19, 2018, 1490-1497.
3. - Evangelina Ramírez Lara, Javier Rivera De la Rosa, …, A comprehensive hazardous waste management program in a Chemistry School at a Mexican university. Journal of Cleaner Production, 142, Part 420, 2017, 1486-1491.
4. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-087-SEMARNAT-SSA1-2002 Protección ambiental-salud, ambiental-residuos peligrosos biológico-infecciosos-clasificación y especificaciones de manejo.
5. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052-SEMARNAT-2005, Que establece las características, el procedimiento de identificación, clasificación y los listados de los residuos peligrosos.

6. NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-054-SEMARNAT-1993, que establece el procedimiento para determinar la incompatibilidad entre dos o más residuos considerados como peligrosos por la NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-052- SEMARNAT-2005.

Exploración en el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS usando redes neuronales artificiales

Sánchez, L.F.,[1] González-Salcedo, L.O.,[1]

[1]Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, Facultad de Ingeniería y Administración, Grupo de Investigación en Eficiencia Energética y Energías Alternativas – GEAL, Palmira, Colombia.

lufsanchez@unal.edu.co logonzalezsa@unal.edu.co

1. Resumen

Para el calentamiento de agua con energía solar, se usan sistemas térmicos que incluyen el uso de colectores solares siendo los más comunes para este tipo de aplicación, los colectores de placa plana. El proceso de diseño del sistema térmico involucra entre otros aspectos, el dimensionamiento del área de la superficie colectora, la cual se determina a partir de las condiciones ambientales, condiciones de energía solar disponible, ubicación geográfica, condiciones de colocación del colector, demanda de agua, y características de fabricación del colector; y protocolos de diseño que están estandarizados. En el presente trabajo se explora el uso de redes neuronales artificiales como herramienta tecnológica en el dimensionamiento del área colectora. Para evaluar la confiabilidad en la estimación se usó como indicador de desempeño, el factor de correlación lineal R. Los resultados muestran que la estimación usando la técnica elaborada es confiable y puede ser usada de manera generalizada.

2. Introducción

Las energías alternativas o no convencionales corresponden a aquellas que no se derivan de los hidrocarburos, siendo estas solar, eólica, biomasa, geotérmica, maremotriz, hidráulica y nuclear [1]. La energía solar se puede aprovechar de manera directa o indirecta, y de forma directa dos aplicaciones se derivan, el aprovechamiento fototérmico y el aprovechamiento fotovoltaico. En el primero, la energía por radiación es convertida en energía calorífica y las aplicaciones más

conocidas corresponden al calentamiento de agua para usos domésticos, lo cual es conocido como agua caliente solar [2].

El agua caliente solar o agua calentada por sistemas solares, se refiere al calentamiento del agua caliente sanitaria – ACS, utilizando la energía solar por diversos métodos. Para tal fin, se utilizan dispositivos diseñados para colectar la energía recibida por el sol, que elevan la temperatura del fluido que circula dentro de este dispositivo. Estos dispositivos se denominan colectores solares, y se disponen de tal forma que su orientación se realiza hacia la dirección del eje ecuatorial, es decir en el hemisferio norte se orientarán hacia el sur, y en el hemisferio sur hacia el norte. En las aplicaciones más comunes, de uso doméstico, de más fácil instalación y menor costo, utilizan colectores que consisten en superficies planas por la que discurre una tubería por la que discurre el agua que se ha de calentar; este conjunto superficie – tubería son o están pintados de color negro, que absorbe la radiación solar. Este colector se denomina colector de placa plana – cpp [3].

El rendimiento de los colectores de placa plana depende de varios factores [4]: 1. La insolación, horas del sol y situación geográfica; 2. La adecuada colocación del colector, orientación, inclinación y ausencia de elementos que les de sombra; 3. Las pérdidas hacia el ambiente exterior, debidas por las diferencias de temperatura entre el exterior (ambiente) y el interior (dentro del colector); entre otras. Un cpp no es tecnológicamente complejo y aunque su margen de evolución es muy limitado, consiguen en la actualidad captar más del 95% de la energía recibida del sol, superando el rendimiento de los dispositivos de aprovechamiento fotovoltaico, los paneles solares fotovoltaicos, que convierten directamente la energía por radiación en energía eléctrica, y que comúnmente está entre 15-20%. Así mismo, se estima que el 80% del consumo energético de una vivienda se produce en forma de agua caliente a baja temperatura, con aplicaciones en calefacción y ACS.

El diseño de sistemas de energía solar térmica para ACS, incluye el dimensionamiento de la superficie colectara usando cpp; para lo cual dependiendo del consumo de agua caliente, las condiciones de temperatura ambiente y del agua en la red, las condiciones de ubicación geográfica (latitud, calidad del aire, factores de corrección por latitud e inclinación), las propiedades características del colector expresadas en su ecuación de rendimiento, y la determinación mensual de las necesidades energéticas que serán suplidas por la energía solar disponible, conlleva al cálculo del área de la superficie colectora representada en unidades de cpp seleccionados [5]. Este procedimiento que puede ser sistematizado, incluso en hojas electrónicas, incorpora entonces variables que dependen de la tipología del colector (propiedades de los materiales, dimensiones), de las condiciones externas (condiciones medioambientales, fluido caloportador) y de las variables medibles (pérdida de energía térmica, factores de eficiencia, eficiencia global), requiriendo la disponibilidad de la información, su conocimiento y posterior aplicación en el procedimiento de diseño.

El proceso de diseño de sistemas de energía solar térmica para ACS y su automatización, particularmente usando software para tal fin, crean la necesidad de estrategias que permitan recurrir a las variables mencionadas, conllevando a la herramienta computacional a un costo informático relacionado con operaciones de programación, codificación, memoria y tiempo de utilización – resolución del problema, planteando entonces la búsqueda de aplicaciones relacionadas con el aprendizaje de máquinas que faciliten la operación final de calcular el área de la superficie colectora.

Este problema que se plantea crea un campo fértil de aplicación de la Inteligencia Artificial, a partir de técnicas de estimación basadas en redes neuronales artificiales.

Por su parte, la Inteligencia Artificial, término acuñado en 1956, es la rama científica que combina las matemáticas y la computación para crear “máquinas inteligentes” capaces de resolver problemas que el ser humano resuelve tanto de manera cotidiana como de manera especializada, a partir de la incorporación en estas máquinas de diversas técnicas que “las conviertan en inteligentes” [6]. Una de sus técnicas son las redes neuronales artificiales, que corresponden a sistemas conexionistas en los cuales un modelo computacional se inspira en el aprendizaje de las neuronas biológicas del cerebro humano (Figura 1), y son definidas como excelentes reconocedores de patrones que pueden resolver problemas puntuales y adaptarse a situaciones según su entrenamiento, generando excelentes resultados [7]. Diversas aplicaciones de redes neuronales artificiales han sido desarrolladas para explorar el dimensionamiento de áreas colectoras en sistemas de ACS, siendo algunas simples en la consideración de las variables a reconocer, pero que limitan su uso para condiciones generales, y algunas más complejas que consideran todas las variables de diseño, pero que requieren de la información de dichas variables [8].

En el presente estudio, se explora el uso de redes neuronales artificiales con arquitectura multicapa, alimentación de información hacia adelante y metodología de aprendizaje/ajuste del error hacia atrás, denominadas como Perceptrón Multicapa feedfoward – backpropagation, en el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS. Estas herramientas de inteligencia artificial fueron entrenadas para predecir el área de la superficie colectora basado en colectores de placa plana, dispositivo que es identificado a partir de su curva de rendimiento. El desempeño de las redes neuronales basado en el coeficiente de correlación lineal (R > 0.97) muestra una herramienta confiable en la resolución del problema planteado del área de la superficie colectora requerida y potencia su uso como componente informático del software para el dimensionamiento de sistemas de energía térmica para ACS.

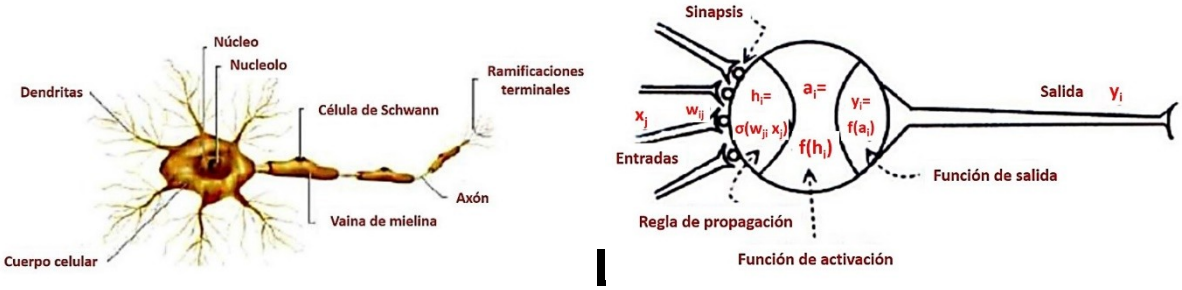


Figura 1. Neurona artificial (derecha) emulada a partir de la neurona biológica

3. Condiciones experimentales

3.1 Ubicación geográfica del campo de exploración

El estudio se realizó para ubicaciones geográficas localizadas en el hemisferio norte, considerando como referencia de dicha ubicación la latitud, expresada como la distancia angular entre la línea ecuatorial y un punto determinado de la Tierra, en dirección norte, medida a lo largo del meridiano en el que se encuentra el punto, expresándose en medidas angulares que varían desde los 0° del Ecuador hasta los 90°N del polo norte.

3.2 Construcción del conjunto de entrenamiento de las redes neuronales artificiales

Para el entrenamiento de las redes neuronales artificiales se prepara una base de datos conformada por patrones o vectores de información, que le permiten al modelo de predicción hacer el reconocimiento de las relaciones que existen entre las neuronas (variables) de entrada que conllevan al resultado de la neurona a predecir (variable de salida). Para tal fin, de acuerdo con el protocolo de diseño de sistemas de energía solar térmica para ACS propuesto por CENSOLAR [9], se hace una selección de variables de entrada relevantes en el problema de dimensionamiento (determinación del área) de la superficie colectora en sistemas de aprovechamiento de la energía solar para calentamiento de agua.

Estas son las siguientes: Latitud en grados [LAT], consumo anual promedio en m^3 [Q], temperatura del agua en la red en °C [Ta], Irradiación solar horizontal promedia en MJ/m^2/día [H], término independiente de la curva de eficiencia del colector solar a usar [b], pendiente de la curva de eficiencia del colector solar a usar [m], factor de corrección de H acorde al entorno [fk], siendo 1.05 para ambientes libres de polución, 0.95 para ambientes urbanos, y la inclinación de la superficie colectora en grados [I]. Como variable de salida se asocia, se asocia a esta información para cada patrón el área de la superficie colectora en m^2 [A].

Posterior a la determinación de las variables de entrada y de salida, se realiza la elaboración de la base de datos general con la cual se determina el conjunto de entrenamiento, conformado por 100 vectores de información (variables de entrada y de salida), usando el protocolo de diseño propuesto por CENSOLAR [9].

3.3 Elaboración y entrenamiento de las redes neuronales artificiales para la estimación del área colectora en sistemas de energía solar térmica para ACS

Se usa el conjunto de entrenamiento mencionado en la sección 3.2, en el cual se relacionan las variables de entrada con la variable de salida, se elabora una propuesta de red neuronal artificial y se plantea una arquitectura neuronal artificial multicapa alimentada hacia adelante y con metodología de entrenamiento/aprendizaje hacia atrás (Figura 2), denominada Perceptrón Multicapa de feedfoward – backpropagation y cuyas características han sido definidas en la literatura [10]. La arquitectura multicapa se propone con una capa de entrada, una capa oculta y una capa de salida, y se fija el límite superior del número S de neuronas de la capa oculta usando la ecuación 1 [11]:

$$S < (N_{data} - 1)/(n + 3) \quad (1)$$

Donde, S es el límite superior del número de neuronas de la capa oculta, N_{data} es el número de patrones de entrenamiento (900), n es el número de variables consideradas en el problema a

resolver (entradas y salida, 9). De acuerdo con la ecuación 1, se fija el límite S, como 75 neuronas en la capa oculta.

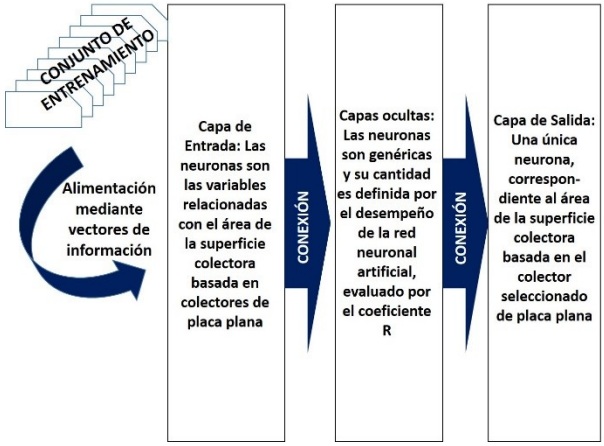


Figura 2. Propuesta de red neuronal artificial para la estimación del área de la superficie colectora basada en un colector de placa plana seleccionado

Las conexiones entre neuronas de las capas se representan mediante funciones de activación. Así, la conexión entre neuronas de la capa de entrada a la capa oculta se realiza por medio de la función sigmoidea. Por su parte, la conexión entre la capa oculta y la neurona a estimar, ubicada en la capa de salida, se hace usando la función lineal, de tal manera que se permita la comparación de la estimación y el resultado verdadero, como se describe en el entrenamiento supervisado.

El procedimiento de entrenamiento para el conjunto respectivo se realizó, de acuerdo con lo descrito por Sánchez, 2020 [8], con 84 conformaciones de topologías de redes neuronales artificiales, obtenidas del producto entre 12 métodos entrenamiento de backpropagation y 7 arquitecturas de neuronas en la capa oculta. Dichas conformaciones se evaluaron a partir del coeficiente de correlación lineal R, obtenido en la ecuación 2 [7], estadístico usado para evaluar la calidad del desempeño de las redes neuronales artificiales supervisadas. Para el funcionamiento computacional del procedimiento de entrenamiento se codificó un algoritmo usando el lenguaje de programación M, propio de la herramienta del software MATLAB® para plataforma Windows®. El código usa la librería contenida en el Neural Networks Toolbox del mismo software, lo cual permite implementar los modelos del tipo de red que se ha descrito.

$$R = \sqrt{}\left(1 - \left(\left(\sum_{i=1,n}\left(A_{real,\,i} - A_{estimado,\,i}\right)^2\right) / \left(\sum_{i=1,n}\left(A_{real,\,i}\right)^2\right)\right)\right) \quad (2)$$

Donde, $A_{real,\,i}$ es el área de la superficie colectora obtenida mediante el protocolo de diseño propuesto por CENSOLAR [9], $A_{estimado,\,i}$ es el área de la superficie colectora estimada por la red neuronal artificial, i corresponde a la posición del par de datos correlacionados y, n corresponde al total de datos en cada subconjunto que se describen a continuación. Los 100 vectores de información del conjunto de entrenamiento se categorizaron en tres subconjuntos que conformaron

igual número de fases en el entrenamiento de la red neuronal: 1.- de aprendizaje, en donde se configuran los pesos sinápticos en las conexiones entre las neuronas; 2.- de prueba, con lo cual se determinó en el que debe dejar de entrenar y optimizar la estructura de la red neuronal y las especificaciones del modelo interno, de acuerdo con el método de aprendizaje que usa el algoritmo de backpropagation; y 3.- de validación, se dónde se probó la capacidad de generalizar el modelo para el rango de información que se utilizó para la calibración.

A partir del indicador de desempeño se evaluaron las estimaciones de las redes neuronales y las salidas reales de la base de datos, en los subconjuntos de cada fase de entrenamiento (aprendizaje, prueba, validación, y adicionalmente de simulación con el total de datos, para lo cual se consideraron el 60, 20, 20 y 100% de los datos, respectivamente, y agrupados por división aleatoria de los datos).

Los resultados de este proceso mostraron que para este caso de estudio, la arquitectura con una capa oculta de 70 neuronas, y con el método de aprendizaje de Levenberg-Marquardt obtuvo mejor, adecuado y confiable desempeño ($R > 0.97$) que los demás métodos de entrenamiento usados (Regularización Bayesiana, Cuasi-Newton de Algoritmo BFGS (Broyden-Fletcher-Goldfarb-Shanno), Retro-propagación Resiliente, Gradiente Conjugado Escalonado, Gradiente Conjugado con Reinicio de Powell-Beale, Gradiente Conjugado de Fletcher-Powell, Gradiente Conjugado de Pollak-Ribiére, Secante de un Paso, Gradiente Descendiente con Tasa de Aprendizaje Variable, Gradiente Descendiente con Momento, y Gradiente Descendiente). De esta manera, arquitectura de la mejor red neuronal se configuró entonces con una capa de entrada con ocho variables de entrada, una capa oculta con 70 variables, y una capa de salida con una variable de respuesta, y algoritmo de aprendizaje backpropagation de Levenberg-Marquardt (Figura 3).

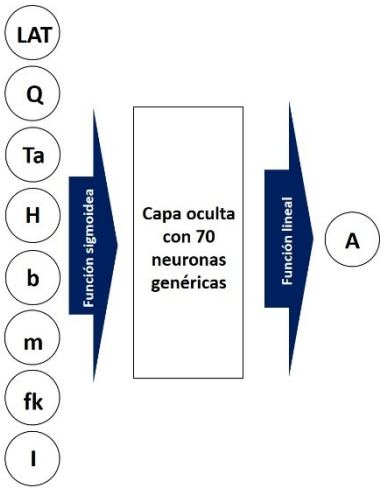


Figura 3. Red neuronal artificial seleccionada para la estimación del área de la superficie colectora basada en un colector de placa plana seleccionado

4. Resultados y discusión

A partir del paradigma de la Inteligencia Artificial basado en redes neuronales, se elabora una red neuronal artificial supervisada del tipo Perceptrón Multicapa, con alimentación hacia adelante y entrenamiento/aprendizaje para la propagación del error hacia atrás, se realizó la estimación del área de la superficie colectora, usando colectores de placa plana, en el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS. La red neuronal artificial consistió en una red conformada con una capa de entrada con 8 variables de entrada, una capa oculta con 70 neuronas, una capa de salida con una variable de respuesta correspondiente a la estimación del área de la superficie colectora y algoritmo de aprendizaje de Levenberg-Marquardt.

La Figura 4 muestra los resultados de desempeño de la red neuronal artificial seleccionada para resolver el caso de estudio y para cada una de las etapas de entrenamiento de la misma (entrenamiento, prueba, validación computacional y, simulación con todo el conjunto de entrenamiento). Para las etapas donde la red seleccionada estima el área de la superficie colectora, se hace una comparación entre el resultado obtenido por la red neuronal artificial (output) y el valor obtenido usando el protocolo de diseño (target), para lo cual se asocia a dicha comparación el factor de correlación lineal R.

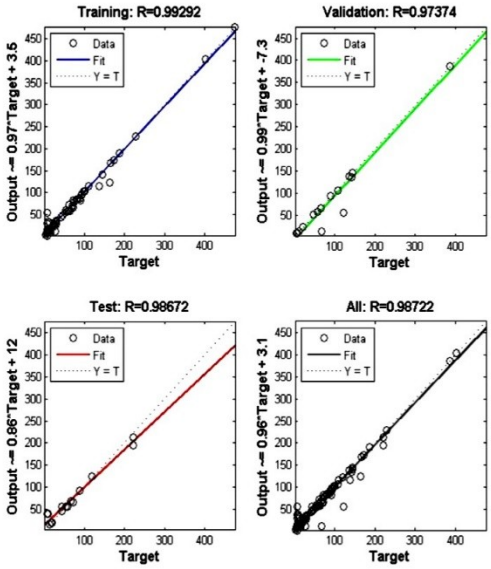


Figura 4. Resultados de desempeño para la red neuronal artificial entrenada para estimar el área de la superficie colectora basada en un colector de placa plana seleccionado, usando el coeficiente de

correlación lineal R entre el área de la superficie colectora obtenida con el protocolo de diseño y el estimado por la red neuronal para cada fase de entrenamiento (entrenamiento, prueba, validación y simulación con todos los datos)

Este desempeño basado en el factor de correlación lineal R (R > 0.97) muestra una relación lineal positiva fuerte entre el valor del área de la superficie colectora obtenida a partir del protocolo de diseño y el obtenido mediante la predicción de la red neuronal seleccionada [9], lo cual permite inferir que la herramienta computacional es adecuada y confiable para hacer dichas estimaciones. El valor del coeficiente de correlación lineal R muestra que hay una aproximación del resultado obtenido por predicción, lo cual verifica la bondad en el ajuste de dicha predicción (Figura 5), permitiéndose inferir que el modelo computacional basado en la red neuronal artificial puede ser usado como metodología para el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS, para el caso de estimación del área de la superficie colectora basada en colectores de placa plana [9].

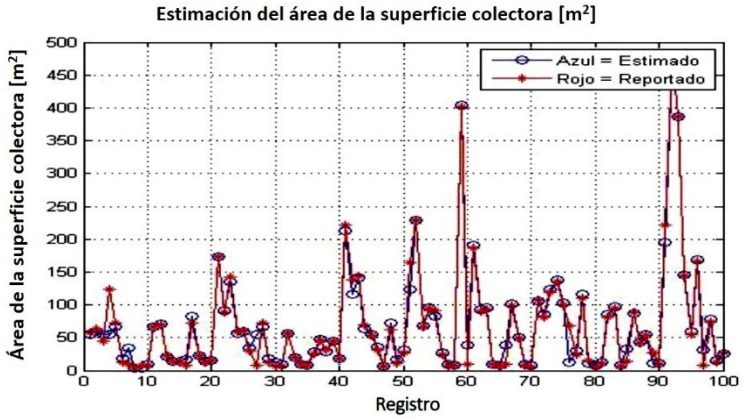


Figura 5. Comparación gráfica de los resultados entregados por la red neuronal artificial y los obtenidos por el protocolo de diseño

La literatura reporta diversos trabajos sobre diseño de sistemas de energía solar térmica y en particular su aprovechamiento para calentamiento de agua, mediante el desarrollo de modelos matemáticos, el uso de software para modelado de procesos, la metodología de superficies de respuesta y las redes neuronales artificiales. En dichos reportes se busca, en algunos casos, comprender el proceso de intercambio de calor, la resistencia de diversos materiales y como operan en diferentes latitudes.

Con respecto al uso de redes neuronales artificiales, Cáceres (2015) [8] realiza el diseño y optimización de colectores solares para ACS a utilizar en zonas del Ecuador, a partir de luso de redes neuronales de backpropagation del software Neurosolution, para estimar el coeficiente global de pérdidas térmicas, R = 0.977 (considerando 15 variables de entrada), el factor de eficiencia de la sección, R = 0.995, y el factor de remoción de calor, R = 0.996 (considerando 9 variables de entrada), y la temperatura de salida del fluido, R = 0.972, el calor útil, R = 0.987, y la eficiencia global del colector, R = 0.989 (considerando 10 variables de entrada). Valle (2009) [8] estudia el comportamiento dinámico de un sistema de calentamiento solar de aire usando redes neuronales artificiales, para lo cual considera 7 variables de entrada las cuales correlaciona con la estimación la temperatura de aire a la salida del colector, obteniendo un coeficiente de correlación lineal R = 0.97. Díez & Falagán (2013a, 2013b) [8], reportan el modelado de un captador solar usando redes neuronales artificiales, con las cuales estiman la temperatura del agua a la salida del colector considerando cuatro variables de entrada (Irradiación solar, temperatura ambiente, temperatura del agua a la entrada del colector y caudal de agua bombeado), sin especificar el coeficiente de correlación lineal.

Para la red neuronal artificial elaborada en el presente estudio y entrenada para estimar la superficie colectora de un sistema de energía solar térmica para ACS, su resultado de desempeño evaluado a partir del coeficiente de correlación lineal R, muestra que esta estimación es concordante con diversos trabajos mencionados y desarrollados para la temática del uso de redes neuronales artificiales y estimaciones relacionadas con parámetros del calentamiento de agua con energía solar; esto permite inferir que la red neuronal artificial propuesta puede ser usada confiablemente como herramienta de predicción en el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS y, en particular, en la determinación del área de la superficie colectora basada en colectores de placa plana. Sin embargo, para la temática de redes neuronales artificiales, no se evidencian trabajos para el dimensionamiento del área colectora en aplicaciones de aprovechamiento de energía solar para ACS.

5. Conclusiones

El trabajo permite mostrar el entrenamiento de una red neuronal artificial, que corresponde a una red multicapa feedfoward-backpropagation, para ser usada en el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS, en este caso para la estimación del área de la superficie colectora basada en colectores de placa plana; la red neuronal artificial generaliza adecuadamente los resultados que se obtienen en los

protocolos convencionales de diseño. Los resultados obtenidos permiten trazar las siguientes conclusiones y recomendaciones para futuras agendas:

- El indicador de desempeño considerado, el factor de correlación lineal R, muestra que la red neuronal artificial es confiable para la estimación del área de la superficie colectora basada en colectores de placa plana, para el problema de dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ACS, acorde a los resultados que se obtendrían con los métodos convencionales de diseño.
- La consideración en la red neuronal artificial de variables que identifican la ubicación geográfica del proyecto (latitud) y las condiciones de disposición del colector (inclinación del colector), en conjunto con el resultado del indicador de desempeño, muestran la capacidad de la red de relacionar estas variables con la influencia que tienen sobre el valor de la energía por radiación disponible, como se establece en los protocolos de diseño. Esto evidencia lo reportado en la literatura, sobre la capacidad como reconocedora de patrones la tecnología neuronal artificial, generando así una herramienta de predicción universal en el problema abordado.
- La exploración realizada permite potenciar el uso de la red neuronal artificial para su uso como herramienta computacional para procesos de sistematización del protocolo de diseño, por ejemplo, como componente lógico en el aprendizaje de máquinas para tal fin.
- Se abre una agenda futura de investigación y desarrollo informático, al extender el uso de redes neuronales artificiales en el dimensionamiento de sistemas de energía solar térmica para ubicaciones generales (hemisferio norte y hemisferio sur), y de otras tipologías de colectores.

6. Bibliografía

1. Castillo Y., Castrillón M., Vanegas-Chamorro M., Valencia G., Villicaña E., Rol de las fuentes no convencionales de energía en el sector eléctrico colombiano, Prospect. V. 13, N. 1, 39–51 (2015).
2. Lavorde M. A., Williams R. J. J., (Editores), “Energía Solar”, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales, 2016.
3. Moreno A. M., “Proyecto de una instalación de energía solar para la producción de agua caliente sanitaria en un edificio de viviendas”, Universidad de Sevilla, 2013.
4. Ávila A. E., Mendoza J. M., Beltrán J. F., Evaluación energética de un colector solar de placa plana de doble cubierta, Ingeniería & Desarrollo. N. 27, 93–112 (2010).
5. Vásquez G., “Manual de instalaciones de fontanería, evacuación y saneamiento y energía solar en edificación”, Universidad Politécnica de Cartagena, 2011.
6. Ponce P., “Inteligencia Artificial con aplicaciones a la ingeniería”, Alfaomega Grupo Editor, 2010.
7. Tabarquino V. H., González L. O., Will A. L. E., Estimación del volumen de un biodigestor tipo balón usando redes neuronales artificiales, Informador Técnico. V. 80, N. 1, 41–48 (2016).

8. Sánchez L. F., “Elaboración de un modelo neuronal artificial para el diseño de sistemas de calentamiento de agua con energía solar, Universidad Nacional de Colombia Sede Palmira, 2020.
9. Castro M., Colmenar A., “Energía solar térmica de baja temperatura”, CENSOLAR, 2008
10. Hinton G., Connectionist learning procedures, Artificial Intelligence. V. 40, N. 1-3, 185–234 (1988).
11. González-Salcedo L. O., Gotay-Sardinas J., Roodschild M., Will A. L. E., Rodríguez S., Optimización en la elaboración de redes neuronales artificiales usando una metodología de algoritmo de poda, Ingenio Magno. V. 8, N. 1, 44–56 (2017).