



ISSN: 2007-1175

# CiENCiA UANL

Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León



Vehículos submarinos no tripulados  
El análisis de la forma de los datos

Control automático e inteligencia artificial

Año 22,  
Número 96  
julio  
agosto  
2019



Revista Ciencia Uanl



RevistaCienciaUANL  
@Ciencia\_UANL  
RevistaCIENCIAUANL



Una publicación de la Universidad Autónoma de Nuevo León

Mtro. Rogelio Garza Rivera  
Rector

Dr. Santos Guzmán López  
Secretario general

Dr. Juan Manuel Alcocer González  
Secretario de investigación científica y desarrollo tecnológico

Directora editorial: Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo

**Consejo editorial**

Dr. Sergio Estrada Parra / Dr. Jorge Flores Valdés /  
Dr. Miguel José Yacamán / Dr. Juan Manuel Alcocer González /  
Dr. Ruy Pérez Tamayo / Dr. Bruno A. Escalante Acosta /  
Dr. José Mario Molina-Pasquel Henríquez

Coeditora: Melissa Martínez Torres  
Redes y publicidad: Jessica Martínez Flores  
Diseño: Mónica Lozano  
Correctora de inglés: Mónica L. Balboa

Corrección y gestión editorial: Luis E. Gómez  
Asistente administrativo: Claudia Moreno Alcocer  
Portada: Francisco Barragán Codina  
Webmaster: Mayra Silva Almanza  
Diseño de página web: Rodrigo Soto Moreno

Ciencia UANL Revista de divulgación científica y tecnológica de la Universidad Autónoma de Nuevo León, Año 22, N° 96, julio-agosto de 2019. Es una publicación bimestral, editada por la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Dirección de Investigación. Domicilio de la publicación: Av. Manuel L. Barragán 4904, Campus Ciudad Universitaria, Monterrey, N.L., México, C.P. 64290. Teléfono: + 52 81 83294236. Directora editorial: Dra. Patricia del Carmen Zambrano Robledo. Reserva de derechos al uso exclusivo No. 04-2013-062514034400-102. ISSN: 2007-1175 ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor, Licitud de Título y Contenido No. 16547. Registro de marca ante el Instituto Mexicano de la Propiedad Industrial: 1437043. Impresa por: Serna Impresos, S.A. de C.V., Vallarta 345 Sur, Centro, C.P. 64000, Monterrey, Nuevo León, México. Fecha de terminación de impresión: 8 de julio de 2019, tiraje: 2,500 ejemplares. Distribuido por: la Universidad Autónoma de Nuevo León, a través de la Dirección de Investigación.

Las opiniones y contenidos expresados en los artículos son responsabilidad exclusiva de los autores y no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.

Prohibida su reproducción total o parcial, en cualquier forma o medio, del contenido editorial de este número.

Publicación indexada al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, LATINDEX, CUIDEN, PERIÓDICA, Actualidad Iberoamericana, Biblat.

Impreso en México  
Todos los derechos reservados  
© Copyright 2019

revista.ciencia@uanl.mx

# CiENCiAUANL

## COMITÉ ACADÉMICO

### CIENCIAS DE LA SALUD

*Dra. Lourdes Garza Ocañas*

### CIENCIAS EXACTAS

*Dra. Ma. Aracelia Alcorta García*

### CIENCIAS AGROPECUARIAS

*Dra. María Julia Verde Star*

### CIENCIAS NATURALES

*Dr. Rahim Foroughbakhch Pournavab*

### CIENCIAS SOCIALES

*Dra. Veronika Sieglin Suetterlin*

### INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

*Dra. María Idalia del Consuelo Gómez de la Fuente*

### CIENCIAS DE LA TIERRA

*Dr. Carlos Gilberto Aguilar Madera*

## COMITÉ DE DIVULGACIÓN

### CIENCIAS DE LA SALUD

*Dra. C. Gloria María González González*

### CIENCIAS NATURALES

*Dr. Sergio Moreno Limón*

### CIENCIAS AGROPECUARIAS

*Dr. Hugo Bernal Barragán*

### CIENCIAS EXACTAS

*Dra. Nora Elizondo Villarreal*

### CIENCIAS SOCIALES

*Dra. Blanca Mirthala Taméz*

### INGENIERÍA Y TECNOLOGÍA

*Dra. Yolanda Peña Méndez*

### CIENCIAS DE LA TIERRA

*Dr. Héctor de León Gómez*

# Índice

6

## Editorial

María Aracelia Alcorta García

8



## Ciencia y sociedad

**Vehículos submarinos no tripulados: aliados estratégicos de la industria marina**

Alexis Arturo Aguirre-Roldán, Santiago Miguel Fernández-Fraga

14



## Opinión

**Apuntes para la historia de la química en Nuevo León**

Daniel Sifuentes Espinoza

27



## Ejes

**Impacto del control automático e inteligencia artificial**

María Aracelia Alcorta García

35

## Sección académica

36

**Cálculo de regiones de estabilidad robusta para sistemas inciertos mediante herramientas de positividad de funciones**

Mario Alberto López Vega, César Elizondo González, Cornelio Posadas Castillo, Efraín Alcorta García

42

**Propiedades físicas del mesón sigma en el vacío**

José Rubén Morones Ibarra, Mónica del Carmen Menchaca Maciel

48

**Recubrimientos nanoestructurados  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  en aleaciones de aluminio 6061-T6**

Manuel Gutiérrez, Luis Arturo Reyes, Bárbara Bermúdez-Reyes, Lizangela Guerra-Fuentes, Patricia C. Zambrano Robledo

# Índice

54

## **Sobre el análisis de la forma de los datos: un nuevo paradigma en ciencia de datos**

Jesús Francisco Espinoza Fierro, Yitzhak David Gutiérrez Moya,  
Rosalía Guadalupe Hernández Amador

60

## **Optimización matemática multiobjetivo: un procedimiento metaheurístico inteligente aplicado a la segmentación de mercado en una empresa embotelladora**

Roger Z. Ríos Mercado, M. Angélica Salazar-Aguilar

66



## **Andamiajes**

**Si mi casa es tu casa...**

Armando V. Flores Salazar

70

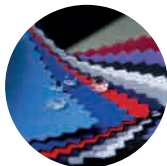


## **Sustentabilidad ecológica**

**Extractivismo, una actividad que atenta contra la sustentabilidad**

Pedro César Cantú-Martínez

78



## **Ciencia en breve**

85

## **Colaboradores**

87

## **Lineamientos de colaboración**

# Editorial 96

MARÍA ARACELIA ALCORTA GARCÍA\*

♦ No cabe duda de que el avance en las ciencias ha impulsado en gran medida el desarrollo de la ingeniería y la tecnología en todos sus aspectos y aplicaciones. En este número 96, correspondiente a los meses de julio-agosto de 2019, haremos un recorrido desde las Matemáticas aplicadas en control automático, optimización y análisis de datos, hasta los últimos avances en Física teórica y nanotecnología.

En el área de control automático, María Aracelia Alcorta García presenta "Impacto del control automático e inteligencia artificial", un panorama histórico del control automático, obtención, usos y aplicaciones en robótica, dando origen a la inteligencia artificial.

Mario Alberto López Vega, César Elizondo González, Cornelio Posadas Castillo y Efraín Alcorta García presentan en su artículo "Cálculo de regiones de estabilidad robusta para sistemas inciertos mediante herramientas de positividad de funciones", el diseño de un controlador de sistemas lineales con incertidumbre paramétrica, basado en la solución de problemas de positividad de funciones multivariadas polinómicas y en la estabilidad de sistemas lineales invariantes en el tiempo (LTI). El algoritmo permite encontrar una familia de controladores que garantizan estabilidad robustamente.

En Física teórica, José Rubén Morones Ibarra y Mónica del Carmen Menchaca Maciel, presentan las "Propiedades físicas del mesón sigma en el vacío", en el cual se calcula la masa física del mesón escalar utilizando su función espectral. El valor obtenido es consistente con el valor experimental reportado en las tablas para la masa de esta partícula.

En su artículo "Optimización matemática multiobjetivo: un procedimiento metaheurístico inteligente aplicado a la segmentación de mercado en una empresa embotelladora", Roger Z. Ríos Mercado y M. Angélica Salazar Aguilar abordan un problema de toma de decisiones en el que debe decidirse cómo

particionar el conjunto de manzanas geográficas de una ciudad en varios territorios para eficientar las tareas y el servicio proporcionado por la empresa a sus clientes. Para resolver este complejo problema se ha desarrollado e implementado una metaheurística multiobjetivo basada en búsqueda dispersa, mostrando su desempeño y superando a los métodos existentes para optimización multiobjetivo (NSGA-II y SSPMO).

En nanotecnología, la generación de conocimiento acerca del desempeño de metales recubiertos con materiales cerámicos nanoestructurados es presentada por Manuel Gutiérrez, L.A. Reyes, B. Bermúdez-Reyes, L. Guerra-Fuentes y Patricia Zambrano Robledo en "Recubrimientos nanoestructurados  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  en aleaciones de aluminio 6061-T6"; los autores reportan el desarrollo y la caracterización de recubrimientos nanoestructurados  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  mediante la técnica de sol-gel en sustratos de aluminio 6061-T6. Los efectos de las pruebas electroquímicas son reportados mediante microscopía electrónica de barrido.

En "Sobre el análisis de la forma de los datos: un nuevo paradigma en ciencia de datos", Jesús Francisco Espinoza Fierro, Yitzhak David Gutiérrez Moya y Rosalía Guadalupe Hernández Amador se enfocan en un aspecto más cualitativo del estudio, a saber: la forma de los datos, en este trabajo describen algunas herramientas y proponen un algoritmo eficiente, auxiliar en el estudio de estructuras de baja dimensión simplicial, inmersas en un espacio de representabilidad de dimensión alta.

\*Universidad Autónoma de Nuevo León.



# CASA UNIVERSITARIA DEL LIBRO

---

REFUGIO DE TODOS PARA LA CULTURA

---

¡Visítanos!

Ven y conoce las instalaciones del nuevo recinto cultural de la UANL, donde podrás asistir a talleres, conferencias y mesas redondas. Nuestra librería cuenta con una variedad de títulos y espacios confortables que invitan a la lectura.

---

LIBRERÍA / ARTE

---

Padre Mier 909 Pte. esquina con Vallarta  
Martes a sábado: 10:00-20:00 hrs. / Domingos: 10:00-14:00 hrs. / Lunes: cerrado  
Entrada libre / Estacionamiento gratuito por Vallarta  
Mayores informes: 8329-4111 y en [publicaciones@uanl.mx](mailto:publicaciones@uanl.mx)



# Vehículos submarinos no tripulados: aliados estratégicos de la industria marina

ALEXIS ARTURO AGUIRRE-ROLDÁN\*, SANTIAGO MIGUEL FERNÁNDEZ-FRAGA\*

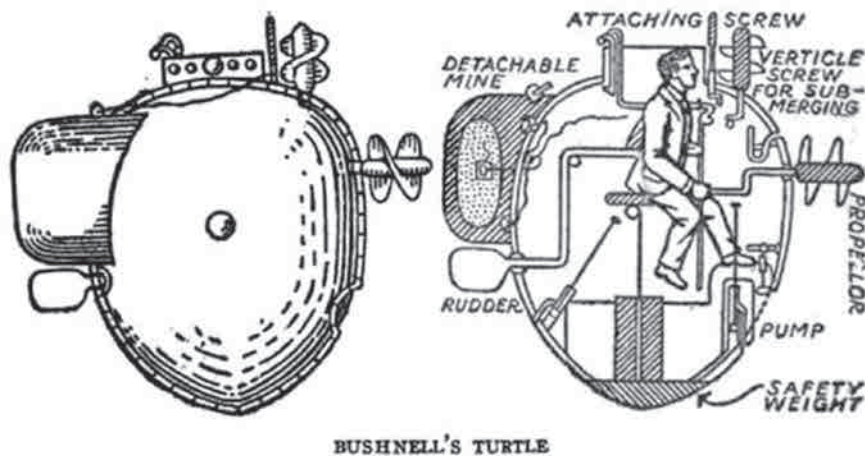


Figura 1. El primer ataque hecho por el submarino *La Tortuga*.

El primer registro de un vehículo subacuático del que se tiene constancia data del año 1578, momento en el cual un inglés llamado William Bourne escribió sobre un submarino en su libro *Inventions and devices* (Preston, 1998), y aunque no existe evidencia de que lo haya construido, significa que la idea de un medio de transporte de este tipo ya había surgido. Aproximadamente medio siglo después, en 1620, el primer prototipo funcional de un vehículo de este tipo fue construido, fue bautizado como *El Drebbel* por su autor, Cornelius Drebbel, y a pesar de que sus planos no sobrevivieron hasta

nuestros días, existen pruebas de que fue el primer submarino de la historia.

En el siglo XVIII, aproximadamente en 1775, surgió *La Tortuga*, un vehículo experimental construido por el estadounidense David Bushnell, ideado con fines bélicos, para su uso durante la Revolución estadounidense. Unos años más tarde, en 1800, fue creado el que es considerado el primer submarino moderno de la historia: *El Nautilus*, un vehículo subacuático de aproximadamente seis metros y medio de longitud, ideado por

\* Instituto Tecnológico de Querétaro.  
Contacto: aaaguirre@hotmail.com



Robert Fulton. Superó de manera exitosa varias inmersiones de prueba, pero fue vendido y desmantelado debido a que no pudo convencer a las armadas francesa e inglesa (Andrews, 2016). Durante el resto del siglo XIX y el siglo XX, diversos inventores de distintas nacionalidades siguieron construyendo submarinos, perfeccionándolos. Su uso fue extendido durante la Primera Guerra Mundial y a finales de ésta, las grandes potencias del mundo se dieron cuenta de su valor, así que decidieron crear versiones más pequeñas que tuvieran una mejor capacidad de patrullaje al ser más veloces (ACNUR Comité Español).

Después de la guerra, han seguido produciéndose submarinos, tanto normales como sus versiones “enanas”, sin embargo, su propósito ahora es más preventivo que operativo (ACNUR Comité Español). Además, dado que el conocimiento de los mares es un tema de gran interés global, se están desarrollando multitud de tecnologías para explorarlo. Actualmente, los minisubmarinos son utilizados para exploración, como en la expedición Deepsea Challenge (El Mundo, 2012), misiones de rescate, como la búsqueda del submarino argentino *ARA San Juan* (BBC Mundo, 2017), así como en investigación científica, ejemplo de ello es el *Slocum Glider*, empleado en programas de investigación en la Universidad de Rutgers (ULPGC, 2009). Desde hace unos años, con los avances en la tecnología, especialmente en el área de la robótica, han sido desarrolladas versiones no tripuladas de estos vehículos: los ROV y los AUV.

## ROV Y AUV, ¿QUÉ SON Y CÓMO FUNCIONAN?

Tanto los ROV (*Remote Operated Vehicle*) como los AUV (*Autonomous Underwater Vehicle*) son vehículos submarinos no tripulados, por lo general, de tamaños reducidos, que pueden ser equipados con multitud de aparatos como cámaras

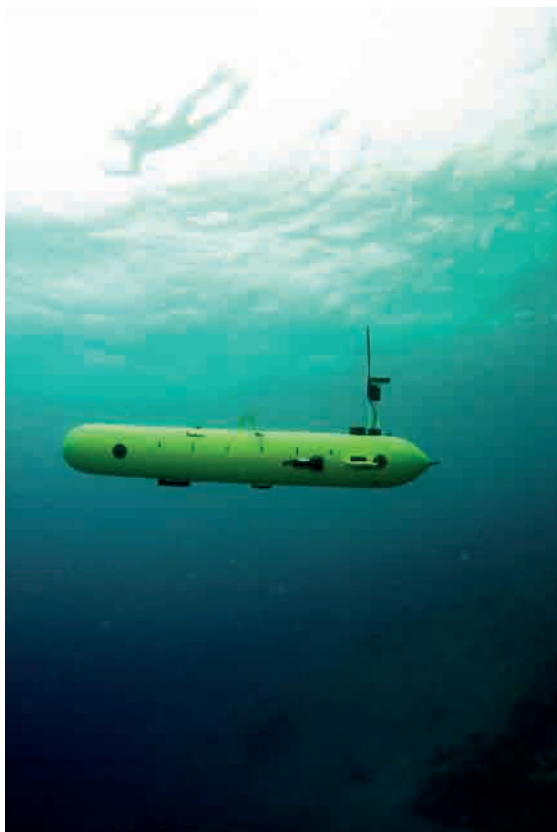


Figura 2. *HydroCamel II* vehículo submarino autónomo (AUV).

de video, sensores y sonares, que le permitan realizar multitud de tareas bajo el agua. La diferencia entre ambos tipos radica en su manejo: los ROV son alimentados, reciben y transmiten mediante cables; a través de éstos, el operador también mantiene comunicación con el vehículo, lo controla y obtiene información de sus sensores y herramientas, todo esto mediante una estación de control (figura 3). Estas estaciones de control pueden ser simples y contener la computadora con la que se maneja al vehículo y las fuentes de poder con las que se alimenta al ROV, pueden incluir pantallas extra para desplegar más información de los sistemas a bordo del mismo, o pueden ser estaciones bastante complejas, ubicadas en habitaciones especiales para ellas.



Figura 3. Estación de control de un ROV.

Por otra parte, los AUV son autónomos, es decir, no requieren el control de un operador y son independientes de cables externos, se alimentan mediante baterías recargables. Dado que las ondas de radio no pueden penetrar mucho en el agua, el uso del GPS en estos vehículos no es posible, así que, para ubicarse, recurren a otro tipo de técnicas, como la navegación por estima.

## ¿DE QUÉ TAMAÑO SON ESTOS VEHÍCULOS?

El tamaño de un ROV o un AUV depende mucho del propósito del mismo y la profundidad a la que serán sumergidos. Pueden existir vehículos pequeños, de menos de 20 cm de diámetro y apenas un par de kilos, que sean capaces incluso de entrar en tuberías submarinas para realizar inspecciones, o vehículos que requieran realizar inmersiones muy profundas, de cinco kilómetros de profundidad o más, que puedan llegar a pesar más de tres toneladas, como el ROV 'ISIS' (figura 4).

## ¿PARA QUÉ PUEDEN SER UTILIZADOS?

Además de la exploración submarina, operaciones de rescate e investigación científica, estos vehículos son muy versátiles y tienen aplicaciones en varias áreas de gran interés.

10

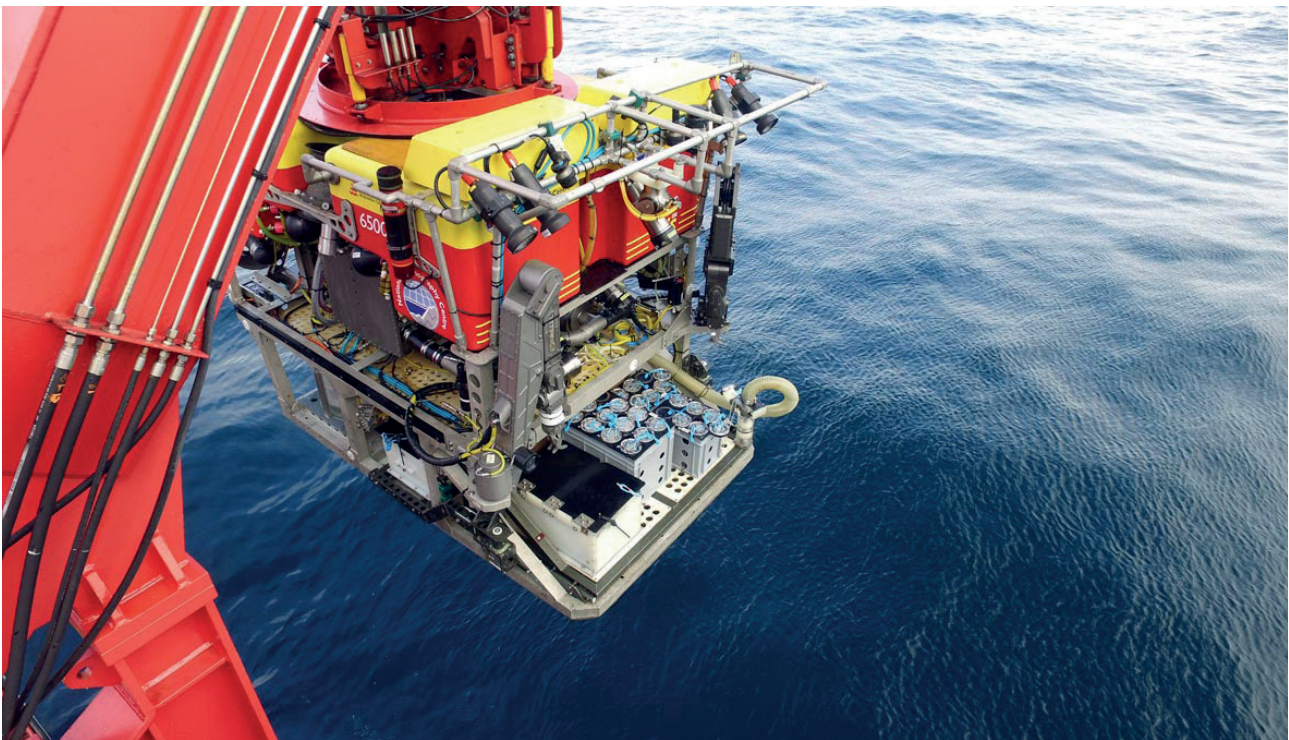


Figura 4. ROV 'ISIS', capaz de sumergirse hasta a 6500 metros.

# Industria pesquera

Una de estas aplicaciones es en la industria pesquera. A. Rojas Granados presentó, en 2014, en Lima, Perú, una investigación sobre el desarrollo de un vehículo submarino autónomo AUV para ayudar a las embarcaciones pesqueras a identificar peces pequeños y evitar capturarlos, pues en el país, la captura de ejemplares jóvenes está sancionada con multas proporcionales a la cantidad de la pesca (Granados, 2014). En China, un exgranjero llamado Zhang Wuyi inició un negocio de construcción de mini submarinos para apoyar a los pescadores locales (RT, 2013). En Querétaro, México, una *startup* llamada Tecnologías Marinas México (TMMx) diseñó un minisubmarino de tipo ROV, cuyo fin es aumentar la productividad de las empresas pesqueras al proporcionarles un conjunto de tecnologías como sensores, cámaras y sonares, que permiten la detección oportuna de cardúmenes, mejorando la capacidad de captura (Obispo, 2017).

La incorporación de vehículos no tripulados de tipo ROV en este proceso incrementará la efectividad de la captura del recurso marino. En la actualidad, la detección se realiza principalmente mediante técnicas de observación directa desde el barco, o el análisis del comportamiento de creaturas como aves y delfines, llamada localización visual (Lemus y Torres-García, 2007). También es realizada la observación mediante aviones o avionetas que, a pesar de ser más actual, sólo permite detectar cardúmenes superficiales y requiere un piloto y observadores con mucha experiencia, además de depender de condiciones marítimas muy favorables, como una muy buena



iluminación y que el mar se encuentre en estado de calma. A pesar de que la observación directa desde hace unos años es apoyada con tecnologías como sonares desplegados desde el barco, su uso está limitado a un radio alrededor del navío.

La implementación de vehículos submarinos no tripulados da a la industria pesquera una herramienta que permite buscar en el océano y sus profundidades sin la necesidad de desplazar las embarcaciones para ello, con el consiguiente ahorro que esto implica: debido al incremento en los precios del combustible, el coste operacional de los motores es mayor que el de abastecer a un minisubmarino. El objetivo es utilizarlos como pequeños y autónomos exploradores que reportan sus observaciones a los navíos.

## Mantenimiento submarino

Otra de las áreas donde estos vehículos son de gran utilidad es el sector de la inspección y mantenimiento. Desde la inspección de los cascos de los navíos que conforman flotas, ya sean mercantes o pesqueras, a la inspección de estructuras marinas, como plataformas petrolíferas, ductos, presas, puentes, etc., los ROV pueden ser empleados para cumplir estas tareas.

Sumado a las herramientas ya mencionadas, estos vehículos pueden ser equipados con brazos robóticos, cortadoras, soldadoras y equipo de ultrasonido, los cuales les permiten extender sus capacidades y pasar de un rol de

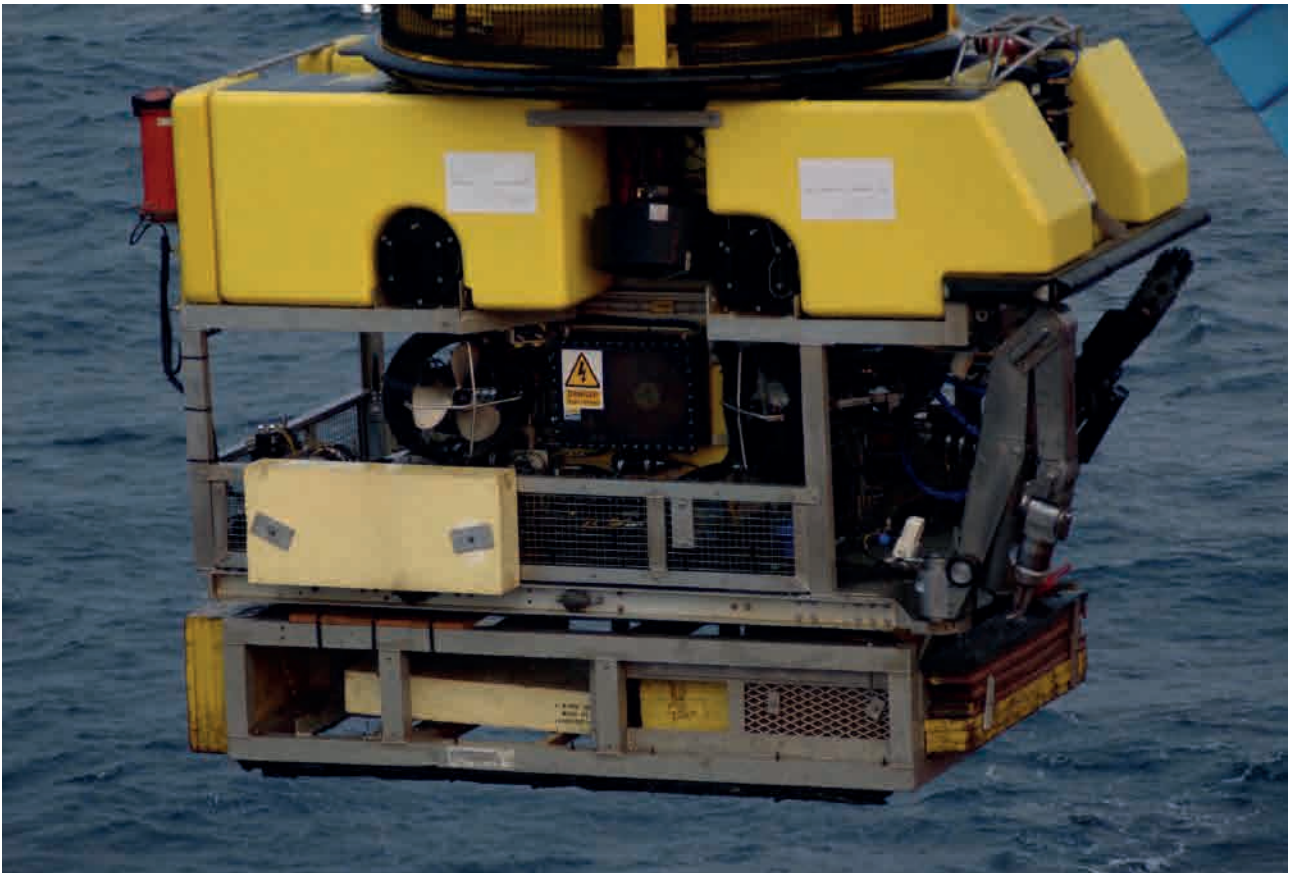


Figura 5. ROV equipado con cortador y soldadora.



exploración a uno de inspección y mantenimiento. Con los avances en robótica, estos dispositivos son cada vez más precisos, esto posibilita lograr una precisión bastante cercana a la que tiene un humano realizando las tareas.

Su uso tiene una gran ventaja: reduce el riesgo de emplear buzos para estas tareas, pues suelen ser bastante peligrosas, ya sea por la profundidad a la que se realizan o por la naturaleza de la actividad. El proporcionarle equipo de ultrasonido permite al vehículo poder detectar grietas y daños estructurales internos en los navíos, daños que no pueden ser detectados mediante observación directa. Sus computadoras a bordo pueden formar imágenes mediante los datos obtenidos al realizar un barrido de ultrasonido. Estas imágenes son posteriormente analizadas por el operador del vehículo, el cual determina si existe alguna grieta en la superficie analizada.

## CONCLUSIÓN

Los vehículos submarinos, ya sean autónomos o de operación remota, tienen mucho futuro. La posibilidad de modelos y tamaños que existen y pueden ser creados, les abren un amplio abanico de campos de uso. En la industria pesquera pueden incrementar el volumen de la pesca, mientras que reducen los índices de pesca accidental. Igualmente, en el área de mantenimiento, pueden reducir

la tasa de mortalidad en buzos al lograr realizar ciertas tareas sin poner en riesgo a un humano. Sin embargo, el hecho de que no puedan ser controlados de forma fiable mediante transmisión inalámbrica, aunado a los precios no tan competitivos al día de hoy, hacen que aún quede tiempo para que todas las empresas o personas que puedan hacer uso de ellos, para implementarlo en sus actividades.

## Referencias

- ACNUR Comité Español. (s.f.). *Minisubmarinos: origen, características y usos*. Disponible en: <https://eacnur.org/blog/minisubmarinos-origen-caracteristicas-usos/>
- Andrews, E. (2016). *9 Groundbreaking Early Submarines*. Disponible en: <https://www.history.com/news/9-groundbreaking-early-submarines>
- BBC Mundo. (2017). *Un minisubmarino con gran poder de inmersión y el avión más grande del mundo: Rusia se une a los esfuerzos internacionales en la búsqueda del buque argentino ARA San Juan*. Disponible en: <http://www.bbc.com/mundo/noticias-america-latina-42119101>
- El Mundo. (2012). *James Cameron 'toca fondo' en las profundidades del Pacífico*. Disponible en: <http://www.elmundo.es/elmundo/2012/03/25/ciencia/1332708721.html>
- Granados, A. J. (2014). *Diseño de un vehículo submarino autónomo*. Lima, Peru: Pontificia Universidad Católica del Perú.
- Grupo Álava. (s.f.). *ROV*. Disponible en: <http://www.grupoalava.com/ingenieros/productos/oceanografia/vehiculos/rov/>
- Lemus, J.L., Torres-García, P. et al. (2007). *El océano IX. La pesca*. Disponible en: <http://bibliotecadigital.ilce.edu.mx/sites/ciencia/volumen2/ciencia3/081/htm/oceano.htm>
- Obispo, H. (2017). *¿Quiénes somos?* Querétaro, Qro.
- Preston, A. (1998). *Submarine Warfare*. Londres, Inglaterra: Brown Books.
- RT. (30 de Septiembre de 2013). *Del paro a ganar miles de dólares: exgranjero chino construye y vende submarinos*. Disponible en: <https://actualidad.rt.com/sociedad/view/107144-submarino-china-sumergible-taller-pesca>
- ULPGC. (20 de Noviembre de 2009). *El submarino oceanográfico en el que colabora la ULPGC, ya está en aguas españolas*. Recuperado el 12 de Marzo de 2018, de Universidad de Las Palmas de Gran Canaria: [https://www.ulpgc.es/noticia/submarino\\_201109](https://www.ulpgc.es/noticia/submarino_201109)



Opinión

Nuevo  
León

# Apuntes para la historia de la química en Nuevo León

Daniel Sifuentes Espinoza (+)\*

El desarrollo de la química en Nuevo León tiene una larga historia, la cual, pocas veces nos hemos detenido a considerar. Sin embargo, resulta interesante echar un vistazo al pasado para conocer cómo ha sido el camino que ha recorrido esta rama del conocimiento que, sin duda alguna, ha tenido mucho que ver con el progreso industrial de la llamada Sultana del Norte, la capital industrial de México: Monterrey.

Al igual que sucedió en el sur del país, las primeras aplicaciones prácticas de los principios de la química en nuestra región se iniciaron desde la época prehispánica con el uso del fuego, el procesamiento

de plantas, tanto alimenticias como medicinales, y en el pigmento utilizado en la pintura rupestre. Durante la época colonial, esos conocimientos empíricos se aplicaron en la minería-metalurgia, en la fabricación de azúcar y, posteriormente, ya en el siglo XIX, en la industria textil, del almidón, la cerveza, etcétera.

Ya iniciado el siglo XIX, el cuarto obispo de Monterrey, Primo Feliciano Marín de Porras, escribía un informe al ministro de gobernación en ultramar, Ciriaco González Carbajal, acerca del Seminario Conciliar de Monterrey, única institución de educación superior en el noreste del virreinato, donde señalaba que...

**“no está la América... para adelantar en las ciencias. La benignidad del temperamento, la molicie de la vida, su carácter tierno y derretido para con el otro sexo, mucho más degradante que las fastidiosas insinuaciones del italiano, y sobre todo el atractivo de las riquezas y continua ocupación de bailes y pasatiempos que ocupan la mayor parte de su vida, los alejan muchísimo de las grandes ideas de estudio e ilustración” (Mendirichaga, 1995).**

\*Edición *post mortem*.

Ya en la era independiente, el Plan de Instrucción Pública de 1829 señalaba que las materias a cursar serían, entre otras: mineralogía, botánica y química. Un año después se sanciona un acta legislativa en la que se alienta a los extranjeros de cualquier nacionalidad a ejercer en Nuevo León “alguna industria, agrícola, fabril o científica”. Esto se podría considerar como el impulso inicial de la presencia de científicos y técnicos que apuntalarían la secularización de la enseñanza, cuyo símbolo más importante sería el Colegio Civil. Un dato adicional es que entre los libros de la biblioteca del gobernador José María Parás, de tendencia liberal, se incluían tratados sobre física, astronomía y química.

Un informe del municipio de Monterrey de 1829 consigna que la incipiente industria, además de otros rubros, incluía cinco alfarerías, 13 fraguas, 15 curtidurías, siete platerías y varias vinaterías que fabricaban mezcal. En los demás municipios

era frecuente encontrar productos elaborados localmente, como jabón de origen lanar y cabrío, plomo y plata en pasta (Mendirichaga, 1996).

Por otra parte, Bernal señala que la química llegó a ser la ciencia del siglo XIX y esto se debió principalmente al hecho de estar conectada con la industria textil. “La producción química –dice Bernal– se realizaba en locales suficientemente pequeños como para permitir un estrecho contacto entre los científicos y los manufactureros en el trabajo... El químico, y particularmente el químico de fines del siglo XIX, estaba más ligado con la industria, lo cual permitió identificar ambos intereses” (Bernal, 1979).

Uno de esos aspectos era la fabricación de jabón, usado como limpiador de telas y para el lavado de las mismas. El proceso básico de la elaboración de jabón consiste en hervir grasas animales o vegetales con un fuerte álcali. La expansión





1787

de fábricas de tejido hizo crecer la demanda de este último producto, y fue tanto lo que se exigió de los recursos naturales, que se hizo prioritaria la síntesis de álcalis. Un método efectivo para fabricar sosa a partir de la sal fue inventado por Nicolás Leblanc en 1787. El procedimiento era el siguiente: la sal común se trataba con ácido sulfúrico y el sulfato sódico resultante se mezclaba con carbón y caliza y se calentaba. La sosa se extraía por lixiviación de la ceniza resultante, y la solución se evaporaba a sequedad en recipientes abiertos (Derry y Williams, 1984). Pero como la acción del ácido sulfúrico sobre la sal producía nubes de gas de ácido clorhídrico muy nocivo, se le tuvo que encontrar a éste un uso más adecuado, esto se logró en el proceso de blanqueado.

Durante mucho tiempo, el método tradicional de blanquear los tejidos había sido tratarlos con suero de manteca o, a partir de 1758, con ácido sulfúrico diluido, y exponerlos después al sol en campos de blanqueado, proceso lento y que requería mucho espacio. El blanqueado químico fue introducido por Berthollet, quien demostró que una solución preparada haciendo pasar cloro a través de potasa tenía una acción blanqueadora muy intensa; posteriormente, Tennant comenzó a fabricar polvo blanqueador. El método de Berthollet fue luego modificado por el proceso Solvay,



más económico y que casi no dejaba residuos (Derry y Williams, 1984).

Estos procedimientos fueron comunes en las diferentes industrias textiles que se afincaron en Nuevo León a partir de 1854, cuando se creó la fábrica La Fama, en Santa Catarina; La Leona, en 1857; El Blanqueo, en 1870, y El Porvenir, en 1871. Esta última, en marzo de 1872, incluía un salón para blanqueo de 20 m de largo por siete y medio de ancho, y producía lienzos blancos conocidos como “imperiales”. Años más tarde, esta misma fábrica recibió la medalla de plata en la segunda exposición industrial celebrada en Nuevo León, por el sulfato elaborado en ese centro fabril, y en 1889, en la exposición internacional de París, ese mismo producto ganó medalla de oro, junto con el almidón elaborado

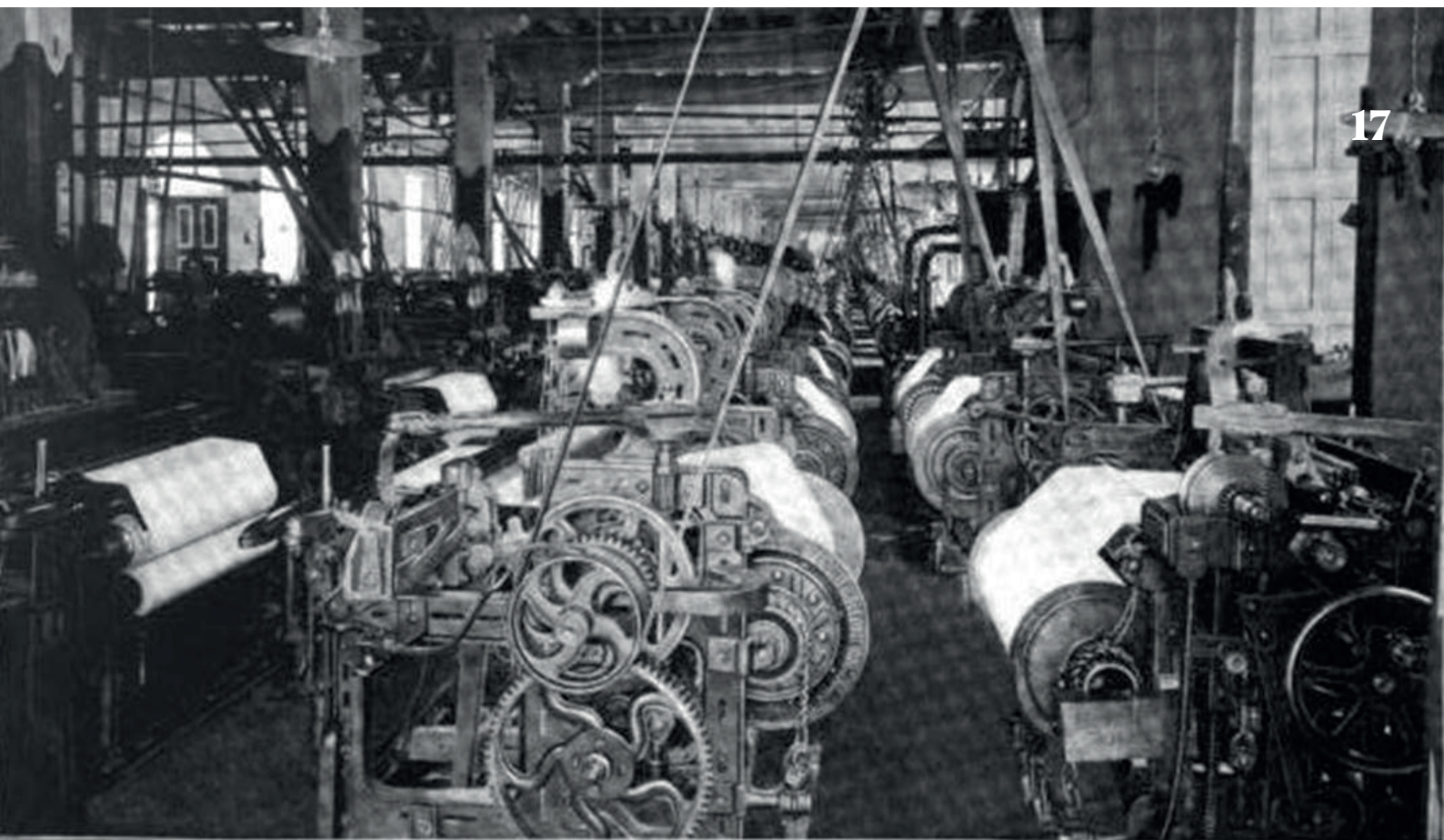
en la fábrica El Hércules, ambas del mismo dueño, Valentín Rivero, quien desde 1879 había recibido el diseño de un aparato para producir ácido sulfúrico, quizá para paliar un poco el constante déficit de esa sustancia en su fábrica El Porvenir (Mendirichaga y Mendirichaga, 1989).

En 1874, el gobernador Ramón Treviño escribía en su *Memoria* que además de los dedicados a los lienzos blancos, había fábricas de velas esteáricas, de municiones, de ácido sulfúrico y sulfato de cobre, cuyo dueño era Luis G. Coindreau. En 1881 se inaugura la escuela de artes y oficios donde se cursarían las materias de física y química.

De la gran cantidad de industrias a las cuales se concedieron exención de impuestos y que se relacionan



con nuestro tema, se encuentra aquella dedicada a extraer el jugo de guayule, concesión otorgada a George Brinckman en 1900. Otra, que data de 1908, la American Crude Rubber, deseaba preparar hule en la hacienda de La Soledad, jurisdicción de Aramberri, Nuevo León. También la fábrica Apolo, fundada en 1893 por Guido Moebius; todavía a mediados del siglo XX estaba ubicada en las calles de Pino Suárez y Arteaga. Elaboraba perfumes, chicles, jabones, productos medicinales, químicos y farmacéuticos. También hubo fábricas de antiselenita y de producción de cal.



**FABRICA "EL PORVENIR."--UNO DE LOS SALONES DE TELARES.**

1911

A pesar del interés mostrado por empresas y establecimientos públicos de enseñanza, lo cierto es que a principios del siglo XX Monterrey carecía de una institución académica adecuada y especializada en la materia. En este sentido, el Dr. Rubén Valdez Zambrano escribió un artículo sobre los orígenes de la Facultad de Ciencias Químicas, escrito que comentaremos enseguida. La escuela de Química y Farmacia de la UNL, como se llamó oficialmente en un principio, fue, según este autor, fue obra única y exclusiva de Andrés Ruiz Flores y Antonio Castillo.

En noviembre de 1911 llegó a Monterrey el Prof. Ruiz Flores para encargarse del servicio químico-farmacéutico de la droguería y botica El León, propiedad de la firma R.A. Bremer y Cía., quien pronto

se relacionó con los pocos colegas titulados que radicaban en la ciudad. Una vez reunidos se plantearon la interrogante del porqué Monterrey, con toda su importancia comercial, carecía de una institución apropiada en la enseñanza de la química. Y decidieron fundar una escuela, pero la idea se fue posponiendo ante el poco apoyo oficial.

Siendo tanto Flores Ruiz como Castillo profesores de la cátedra de farmacia galénica en la escuela de medicina, se funda la Sociedad Farmacéutica de Monterrey, con lo que ambos daban conferencias semanales sobre su especialidad. En ese mismo año de 1928 se esboza una reforma completa a la legislación educativa en nuestro estado, en la que ya se manifestaba la necesidad de crear la tan ansiada Universidad del Norte. Originalmente, la Escuela de Química y Farmacia ocupó un reducido local en donde estaba ubicado el Observatorio

Astronómico del Colegio Civil. Después pasó a una casa en la esquina de Cuauhtémoc y Ruperto Martínez, y más tarde se trasladó a la calle de 15 de Mayo, entre Zaragoza y Dr. Coss, en las instalaciones de la Escuela de Odontología. Previo a su cambio a Ciudad Universitaria, la Asarco, que cedió el terreno, y otras industrias locales, apoyaron la construcción del edificio en las calles de Guerrero y Progreso, durante el gobierno de Bonifacio Salinas Leal (1939-1943) (*Álbum del 350 aniversario de la Fundación de Monterrey*).

En 1932 se expide la ley reglamentaria para el ejercicio de las profesiones médicas y sus ramas, y la referente para el ejercicio de la profesión de ingeniero. Cuando se crea el Instituto Tecnológico, en 1943, se establece la carrera de Ingeniero Industrial Especializado en Química. Como información adicional a la publicidad de estos nuevos estudios, se señalaba que la carrera de



1953

ingeniero químico tendría unos treinta años de existencia y, por tanto, era poco conocida y comprendida. Con el tiempo, el profesionista resultante abarcaría actividades imprescindibles en la industria (Mendirichaga, 1982).

Una edición especial de la revista *México Industrial*, dedicada a Monterrey, en 1953, hace un breve recuento de, entre otras, las fábricas o empresas relacionadas con la industria química. Empieza señalando tres empresas que desde la Ciudad de México proveían de material a diversas industrias locales. La primera de ellas era Celanese Mexicana, creada en 1947, y se le refiere como fabricante de filamento de acetato y celcorta para la industria textil y del vestido. El otro establecimiento señalado es Imperial Chemical Industries, ICI, cuya publicidad dice que la gran reputación de los productos químicos y auxiliares ICI para la industria hulera se basan en las facilidades sin par de esta compañía para la investigación, desarrollo y producción, pues posee una larga experiencia y un conocimiento extenso. La tercera es Monsanto Mexicana, fabricante de productos químicos y plásticos, “sirve a las industrias que sirven a Monterrey”, como poliestireno, compuestos vinílicos, resina vinílica y compuestos de acetato.

Después, en la misma edición, se clasifican las empresas domiciliadas en Monterrey, relacionadas con la industria química. Por ejemplo, uno de los rubros es “productos químicos”, donde se mencionan las siguientes: Abelardo Guerra e Hijos, Agencia Bayer, Alcomex, Dupont, Industrias Químicas Monterrey, Fábricas Apolo, Pigmentos y Óxidos, Productos Químicos Alen, Productos Sarolo y Silicato del Norte. Pigmentos y Óxidos (Pyosa), según señala la publicidad, es una industria proveedora de pinturas, óxidos, dicromatos, litargirios, minios, cerámica, etc., preparaciones cuyo control técnico debe ser rigurosamente preciso para satisfacer las necesidades del consumidor. De una instalación que ocupaba unos 600 m en un principio, en 1953 era una de las plantas más modernas, con una superficie de 8,000 m<sup>2</sup>. Inicialmente, sus actividades se orientaron a la fabricación de óxidos de plomo, pero después se agregaron otros productos como nonsetting, amarillo cromo, amarillo de zinc, óxido de cromo y estaba por lanzar al mercado una línea completa de colores orgánicos.

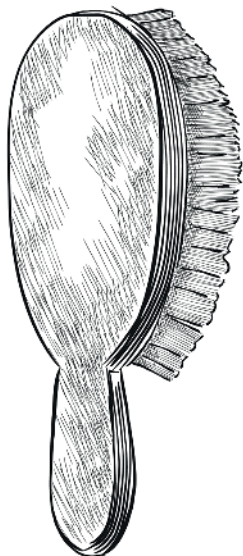
Dentro del rubro “productos químicos industriales” se menciona a Comercial Delta, Pyosa y Química del Golfo. Esta última empresa fue fundada por el Ing. Genaro Arzave el 1 de mayo de 1934, dedicándola a consultas técnicas agrícolas. También distribuía fertilizantes, insecticidas y maquinaria para su aplicación.

En el apartado “productos químicos vegetales” sólo aparece Ma. Laurain de Olivo. En el sector de “productos químicos de hule” incluyen a la Cía. Hulera Monterrey-Pacífico y a Hulera del Golfo. Dentro de “resinas” se menciona a Bakelite de México, Hércules Power Co. y Laboratorios Industriales de Monterrey, este último, fundado por el Ing. Julio Guarneri, producía lacas, esmaltes, barnices, disolventes, resina sintética para la industria y pintura especiales para muebles.

En la división “resinas sintéticas” se incluyen Bakelite de México y Productos Sarolo. En “cemento plástico” aparece nuevamente Silicatos del Norte. En “celuloide” incluyen a Plásticos Monterrey, Artículos de Celuloide y a Industria Termoplástica Mexicana. Esta última inició sus labores en 1940, siendo sus fundadores Emilio Marcos y Jorge S. Zarur.



1936



En la sección “productos de plástico” se menciona a Artículos de Celuloide, Fábricas Monterrey, Industria Termoplástica Mexicana y Tres Emes. Finalmente, en “celulosa” sólo aparece Celulosa y Derivados.

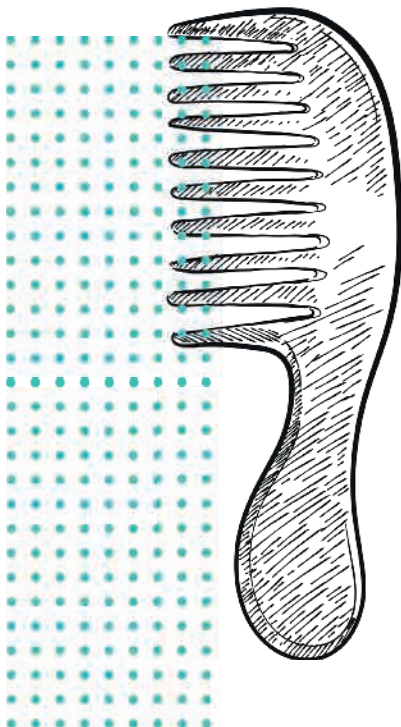
Otras industrias relacionadas fueron Colores Nacionales, fundada en 1936 por Jorge Ramírez Vizcaya y Francisco Vizcaya Ibáñez, que producía materias primas para pinturas. La Compañía Productora de Oxígeno fue fundada en 1922 por el Ing. Esteban Rock y elaboraba oxígeno industrial y medicinal. Oxígeno Nacional fue fundado en 1945 por Alfonso M. Franco, Fernando M. Franco, Virgilio Sepúlveda, Emiliano Degollado y Moisés Domínguez. Celuloide Manufacturado Mayza era fabricante de peines, peinetas, adornos para el pelo y de ornato en general, hechos de celuloide o de otros materiales plásticos. Química Monterrey, fundada en 1943 por Ramón, Roberto y Mario Ruiz, Rubén Lozano y Julio Páez, elaboraba sabores y concentrados, nieve, paletas, etc. El 20 de junio de 1935, el ingeniero químico Gustavo Bernal funda una Oficina Técnica Consultiva, auxiliar de la industria y del comercio, encargándose también de registrar patentes y marcas de bebidas y comestibles (*Álbum del 350 aniversario de la Fundación de Monterrey*).

Mientras tanto, el Instituto de Investigaciones Científicas de la UNL inicia una serie de trabajos de investigación química, en 1943-1944, que se llevaron a cabo en un

laboratorio proporcionado por la Facultad de Ciencias Químicas. Discutido en detalle el proyecto, se llegó a la conclusión de que en un primer momento se harían investigaciones química “pura”, es decir, sin aplicación inmediata. En segundo lugar, se realizarían investigaciones “prácticas”, para finalmente resolver los problemas de logística. La idea era que los trabajos no podían sólo ser de tipo teórico, sino abarcar también los de aplicación industrial o con posibilidades de explotación, “para despertar así el interés del público en general y de los hombres de empresas en particular hacia el Instituto”.

Entre las investigaciones del primer tipo pueden citarse la de “Los aminoácidos en algunos alimentos nacionales y regionales”, donde se señala que se han cuantado (sic) treonina y triptofano, especialmente este último pues tiene interés para México, ya que el maíz constituye la base de la alimentación popular y carece de triptofano, cuya existencia ha sido confirmada por un investigador norteamericano. Los resultados obtenidos por el método FOLIN les confirma esa opinión, pero el hallazgo de nuevos reactivos específicos de aminoácidos sería determinante.

Otra investigación del primer tipo es la de “La obtención de furilmercaptán”, en la que se pretende determinar la sustancia que da al café tostado su aroma especial y agradable, sobre lo que sólo se había encontrado una breve referencia, ya que, efectivamente, tal sustancia tiene ese olor característico del café tostado. Se espera lograr la síntesis.





*Turpin pinx. et d'éc.*

*H. Legrand sculp.*

**GOYAVIER sauvage.**  
**PSIDIUM pomiferum. (Linn.)**  
*(1/2 grand. nat.)*

1. Fleur entière. 2. Pétale. 3. Etamine. 4. Coupe horizontale d'un ovaire. 5. Coupe horizontale d'un fruit. 6. Graine. 7. Id. coupée verticalement. 8. Embryon.

Entre las investigaciones de aplicación industrial se puede mencionar “El desamargado de la levadura de cerveza”, cuyo principal reto consistía en privar a la levadura de su desagradable sabor amargo. Al parecer, se tuvo éxito.

“La obtención de ribosa y su preparación como alimento” es otro trabajo de carácter práctico. A tal efecto se creó un método original para extraer la ribosa del ácido nucleínico. Como se sabe, esta sustancia interviene en la síntesis de la vitamina B2.

Finalmente, se menciona entre este grupo de investigaciones “El cuanteo de la vitamina C en la guayaba”, esta fruta es la más rica en vitamina C entre todas las conocidas, por lo que se llevaron a cabo numerosas dosificaciones en diversas partes del fruto y de la planta con miras a una posible extracción industrial de vitamina C. Las determinaciones fueron hechas sobre frutos al comienzo de su madurez y en el epicarpio, pulpa y semillas frescas y desecadas en corriente de anhídrido carbónico para prevenir la alteración por el aire. Los resultados mostraron cantidades superiores a las que figuran en las tablas de composición de alimentos, pero inferiores a los consignados por algunos investigadores que estiman que la guayaba puede llegar a contener hasta 3% de vitamina C en materia seca.

Los títulos de otras investigaciones eran: “Lipofanerosis de las harinas”, “Cuanteo de fósforo y calcio en cenizas diversas” y “Obtención de tetracetato de plomo” (*Boletín del Instituto de Investigaciones Científicas de la UNL (1943-1944)*).

October 16, 1940

**PACK IT**—washable, quick-drying nylon men's socks! No tight fit follows up! No more—no long soaping! You'll be packing it for many trips to come! The same is true for the "bracket" pantyhose created for the navy.

**WASH WITH IT!** In the shower—over again—uncomplicated! Wash the legs under hot running water, make long soaping. And then—air—drying—will do! Finally, shower nylon socks have a high stretch—through where you are interested in it.

**WASH IT!** Hang it up! Your nylon blouse is almost ready to come again. Dry under its own line—drying itself. No more ironing! No more hanging on the line! Your blouse will keep its look, shape and feminine look—now and hereafter!

**news about NYLON**

*it all started with a stocking*

... it is obvious, however, that the most interesting and most important fact about nylon is that it is a synthetic fiber. It is made from a mixture of carbon, hydrogen, oxygen, and nitrogen. It is the only synthetic fiber that is stronger than steel. It is also the only synthetic fiber that is lighter than air. It is the only synthetic fiber that is resistant to fire. It is the only synthetic fiber that is resistant to acids and alkalis. It is the only synthetic fiber that is resistant to mold and mildew. It is the only synthetic fiber that is resistant to insects and rodents. It is the only synthetic fiber that is resistant to oil and grease. It is the only synthetic fiber that is resistant to salt water. It is the only synthetic fiber that is resistant to UV light. It is the only synthetic fiber that is resistant to radiation. It is the only synthetic fiber that is resistant to nuclear weapons. It is the only synthetic fiber that is resistant to biological weapons. It is the only synthetic fiber that is resistant to chemical weapons. It is the only synthetic fiber that is resistant to nuclear, biological, and chemical weapons. It is the only synthetic fiber that is resistant to all weapons.

**DU PONT**  
REG. U. S. PAT. & TM. OFF.  
BETTER THINGS FOR BETTERIVING  
— FREDERICK C. SHERRETT

**TO MANUFACTURERS:** Are there people there in your industry who will meet the needs of your industry? Write the Nylon Division, E. I. du Pont de Nemours & Co. Inc., Wilmington, Delaware.

**NEWS FREE:** Send for "Nylon: A New Era in Textiles" and "About Du Pont Nylon" Write to Nylon Division, E. I. du Pont de Nemours & Co. Inc., Wilmington, Delaware.

**FOR NYLON... FOR RAYON... FOR FIBERS TO COME... LOOK TO DU PONT**

1884

de extrusión, donde los chips se vuelven líquidos y salen por espesas convertidos en hilos, para pasar a la fase de estiraje o texturizado. En 1994 adquirió tecnología computarizada para la producción de likra (Inegi, 1994).

La celulosa es el material fibroso que producen todas las plantas uniendo en largas cadenas las moléculas de glucosa. Durante mucho tiempo se logró explotar industrialmente, pero sólo hasta hace poco se aprendió a dismantelar las moléculas de la celulosa y reconstruirlas en "sintéticos naturales" hechos a la medida. En 1884, Chardonnet imitó con éxito al gusano de seda dirigiendo químicamente la celulosa y forzándola a pasar por minúsculos agujeros de modo que formara filamentos brillantes sumamente delgados. Al cabo de este proceso, el resultado fue un tipo de rayón, la primera tela hecha por el hombre. El método inicial de producir rayón se perfeccionó en 1894 a través del proceso de la viscosa, desarrollado por Charles F. Cross, Eduard J. Bevan y Clayton Beadle quienes, entre otras sustancias, habían experimentado con bisulfito de carbono que, combinando con la celulosa de álcali (que se produce por la reacción de la celulosa ante la sosa cáustica) les produjo una sustancia granulosa de color anaranjado vivo que al disolverse en sosa cáustica y agua producía una sustancia pegajosa que llamaron viscosa. Se descubrió que la viscosa tratada con ácido se convierte de nuevo en celulosa, pero celulosa diferente cuya molécula era

No debería sorprendernos la presencia de un sector dedicado a la investigación "pura", ya que también la Dupont había decidido, en esa misma época, apostar por un nuevo tipo de búsqueda a largo plazo, sin esperar resultados prácticos iniciales. De ahí que uno de sus laboratorios fuera conocido como "Purity Hall (Salón de la Pureza)". Años después, los resultados sorprenderían al mundo con más de treinta trabajos científicos en los que se establecieron los fundamentos de la polimerización y se creó la verdaderamente primera fibra

sintética, el nylon, ya que la seda y el rayón que tenían muchos años de fabricarse no eran totalmente sintéticos.

Tanto el nylon como el rayón están presentes en Monterrey a través de las empresas que los fabricaron. Para el caso del nylon, Akra (anteriormente Nylon de México) es una empresa que se especializa en la producción de esta fibra. Para su elaboración cuenta con tecnología de punta que permite la fabricación continua de gránulos o chips, que son fundidos en la fase

1945

más pequeña y débil que la celulosa natural. Así se produce el rayón de viscosa (Mark, 1979).

Celulosa y Derivados (Cydsa) es fabricante de rayón. Evaristo J. Ursúa nos dice que para poder entender la evolución de esta empresa es necesario saber que el rayón no es una fibra sintética, sino natural, procedente de la pulpa de la madera de donde se obtiene la celulosa. Y aunque la materia prima no es costosa, el procedimiento de la misma utiliza grandes cantidades de agua y energía, además de ser altamente contaminante del agua y del aire.

Celulosa y Derivados es un grupo industrial mexicano con plantas en ocho ciudades (datos de 2000) y más de 20 subsidiarias, ofreciendo más de 200 diferentes productos. Hasta 2000 estaba compuesta por empresas agrupadas en seis divisiones organizacionales: química y plásticos: Asertec, Quimobásicos, Polycid, Plásticos Rex, Química Ecotec; empaques flexibles: Masterpak, Intermex; fibras: Celulosa y Derivados (fibra acrílica), Celulosa y Derivados (filamentos a base de rayón); hiladuras y textiles para el vestido: Derivados Acrílicos, Ultracil; textiles para el hogar: San Marcos Textil de México, Hometex; división mejoramiento ambiental: Atlatec, Operadora de Servicios de Agua (Ursúa, 2002).

La historia del grupo Cydsa se inicia en 1945 en Los Lirios, una antigua granja lechera ubicada en las afueras de Monterrey, hacia el norte, en una época en que se habían establecido

Superfil  
EL HILADO QUE SE CONVIERTE EN TELA SUPERIOR

23

**CELULOSA Y DERIVADOS, S.A.**  
**Fabricantes de fibra de rayón SUPERFIL**

1958

industrias con giros aún no conocidos en la ciudad. Se había escogido aquel lugar porque había agua suficiente, pues disponían de una buena noria. Sin embargo, la creciente necesidad acuifera de la empresa rebasó todas las expectativas, por lo que fue necesario buscar el preciado líquido con las más avanzadas técnicas de perforación y de bombeo. También se acudió a expertos campesinos para la localización de los mantos acuíferos por medio de varitas especiales, e incluso, en la desesperación, se pidió apoyo a un indio piel roja, pero el resultado fue mínimo. Se perforó a cinco kilómetros de distancia, obteniendo de 30 a 40 litros por

segundo, además se contrataron aguas de desecho de las torres de enfriamiento de la Compañía de Luz y Fuerza Motriz. Finalmente, se compró una planta tratadora de aguas negras que se adquirió en Estados Unidos, iniciando operaciones en mayo de 1956, terminando así la pesadilla que agobió a la empresa por varios años (Mendirichaga, 1996).

En 1945 Cydsa produce por primera vez en México fibra de rayón para la industria textil. Dos años después fabrica seda sintética, a partir de la cual empieza a elaborar cuerdas de rayón para la manufactura de llantas. En 1955 se utiliza la viscosa para producir película transparente. En ese año se asocia con la British Cellophane, iniciando operaciones Celorey para fabricar película de celofán. En 1958 se pone en movimiento la planta

de cloro y sosa cáustica y un año después se integra la de bisulfuro de carbono.

En 1961 se asocia con Alleed Chemical para crear Quimobásicos, proveedora de gases refrigerantes. Cuatro años después se construye en Jalisco la planta Crysel, que produce fibras acrílicas, combinando tecnología de Rhone Poulenc. Poco después se crea Cydsa, S.A., como controladora del creciente grupo de empresas. En 1967 adquiere Química del Istmo, productora de cloro y sosa cáustica, perteneciente a Pemex. También obtiene la concesión para la explotación de domos salinos en Coatzacoalcos, Veracruz. Cuatro años después se asocia con BF Goodrich y adquiere la proporción mayoritaria de Policyd, empresa mexiquense que utiliza la más avanzada tecnología en la fabricación de resinas de PVC,

24

**Greaseproof Packaging**

**...YOU GET IT WITH AVISCO® CELLOPHANE**

No greasy packages to spoil sales when you use AVISCO cellophane. Not only is cellophane greaseproof but it also heat seals easily and securely to prevent grease leakage. Even more, cellophane never clouds on contact with grease—always remains sparkling clear to build sales on sight. That's why it's a must for packaging bacon, potato chips, sweet doughs, nutmeats and numerous other foods. Perhaps your produce has no grease content. Regardless, if it is packaged (or should be packaged) AVISCO cellophane is your best choice. For cellophane is also moistureproof and dustproof—protects your product from handling, yet always shows it to full advantage. It also prints beautifully to identify and glamorize your product, and combines low initial cost with high-speed packaging machine performance unmatched by any other transparent packaging material.

**AVISCO**

AVISCO CELLOPHANE IS A PRODUCT OF AMERICAN VISCOSE CORPORATION • FIBER DIVISION • PHILADELPHIA 3, PA.



1996

materia prima empleada en gran variedad de productos de plástico (Urzúa, 2002).

En 1975 se asocia con Bayer y establece en Veracruz la primera planta de su tipo en América Latina, dedicada a la elaboración de espumas flexibles y semirrígidas de poliuretano. En 1979 crea Propirey, pionera en la fabricación de polipropileno biorientado para la industria de los alimentos empaquetados; Policyd Altamira, la más grande productora de PVC en América Latina, y DASA, empresa de tecnología única en el campo de la hilatura acrílica.

Durante la década de los ochenta refuerza su división de plásticos al adquirir la totalidad de Plásticos Rex y Policyd, con lo que expande su línea de productos y servicios en el campo de la extrusión e inyección de plástico.

Durante los noventa crea una nueva división dedicada al mejoramiento ambiental con la creación de Atlatec para ofrecer un servicio integral en el tratamiento de agua, el Laboratorio de Mejoramiento Ambiental, y se adquiere Química Ecotec, empresa especializada en asesoría y formulaciones químicas para el uso eficiente del agua; asimismo, se instala el Laboratorio Analítico Central, para la búsqueda de soluciones ambientales para la industria, municipios y la comunidad. De igual forma, se incorporan las áreas de ingeniería y servicios bajo el nombre de Dicotec, dedicada al diseño y construcción de plantas industriales y el tratamiento de agua (Urzúa, 2002).

También, al iniciar la década de los noventa, la división empaque crea la empresa Masterpack, en la línea de conservación y preservación de productos. Adquiere también el Grupo Textil San Marcos en Aguascalientes y se consolida como el grupo textil más integrado del hemisferio occidental y desde 1996 inicia un plan de calidad total dirigido a mejorar las prácticas de manufactura en toda la empresa, así como la certificación de todas sus plantas bajo el esquema ISO-9000 e ISO-14000.

Al finalizar la década, Cydsa reporta problemas financieros derivados de la caída internacional de los precios. Como resultado se vende Celorey, se cierran Ultracil y Celulosa y Derivados de Monterrey. También vende sus oficinas corporativas de Cemex, al igual que su unidad de tratamiento de aguas residuales, que incluye Atlatec.

Cydsa creció a partir de su producto inicial, el rayón, y después fue integrando nuevas industrias para asegurar las materias primas para su proceso y llegó a integrar un emporio.

Por otro lado, datos recientes señalan que en las regiones centro y norte del país se concentra la mayoría del empleo, los activos, la producción y el valor agregado de la industria del plástico; dos tercios del sector se ubican en la CDMX, Jalisco y Nuevo León. Además, 90% de las empresas transformadoras de plástico son micros y pequeñas, con menos de 100 personas, las cuales atienden segmentos de mercado que las medianas y grandes no están en posibilidades de servir (Pineda, 2017).



## REFERENCIAS

Bernal, J.D. (1979). *La ciencia en la historia*. México: UNAM-Nueva Imagen.

Derry, T.K., y Williams, T. (1984). *Historia de la tecnología*. México: Ed. Siglo XXI.

Inegi. (1994). Revista Notas Censales. México: Inegi.

Mark, H.F. (1979). Moléculas Gigantes. *Time-Life*. Colección científica.

Mendirichaga, R. (1982). *El Tecnológico de Monterrey*. México: Ed. Castillo.

Mendirichaga, T., y Mendirichaga, R. (1989). *El inmigrante. Vida y obra de Valentín Rivero*. México: EM Ediciones.

Mendirichaga, R. (1995). *Los cuatro tiempos de un pueblo*. México: ITESM.

Mendirichaga, R. (1996). Industria. En *La enciclopedia de Monterrey*. México: Grijalbo.


(s.A.) (1944). (*Boletín del Instituto de Investigaciones Científicas de la UNL (1943-1944)*). México: UANL.


(s.A.) (s.f.). *Álbum del 350 aniversario de la Fundación de Monterrey*. (s.E.).

Pineda, M. (2017). *Industria del plástico: escenario regional*. Plastics Technology México.

Urzúa, E.E. (2002). *Cydsa: el ciclo de la Integración Vertical*. México: (s.E.).


**CiENCIA UANL**


 **UANL**  
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE NUEVA LEÓN




**La revista CiENCIA UANL te invita a publicar tus cuentos de ciencia ficción, dibujos, poemas, comics o fotografías en la sección *Imaginaria*, un espacio dedicado a las muestras artísticas.**

**Si estas interesado, manda un correo a esta dirección [revista.ciencia@uanl.mx](mailto:revista.ciencia@uanl.mx) para mayor información.**

 Revista CiENCIA UANL

 @Ciencia\_UANL

 Revista CiENCIA UANL



Ejes

# Impacto del control automático e inteligencia artificial

María Aracelia Alcorta García\*

La importancia del control automático de procesos, en nuestros días, radica en la reducción del costo asociado a la generación de bienes y servicios, ya que produce un incremento en la calidad y volúmenes de producción de una planta industrial, y estabiliza el comportamiento de las variables que participan en los procesos, lo cual repercute en la reducción de consumo de energía y tiempo. Otro beneficio indirecto del control automático radica en la seguridad industrial de los trabajadores y su salud a corto, mediano y largo plazo, reduciendo la rotación de personal y aumentando el tiempo libre en actividades importantes para la empresa. Otro aspecto que no se puede dejar de mencionar es el logro de una vida con más comodidades y enfocada al mantenimiento de la salud. La eliminación de errores y un aumento en la seguridad de los procesos es otra contribución del uso y aplicación de las técnicas de control.

Es importante destacar que anterior a la aplicación masiva de las técnicas de control automático en la industria, el hombre aplicaba sus capacidades de cálculo, e incluso su fuerza física, para la ejecución del control de un proceso o máquina asociada a la producción. En la actualidad, gracias al desarrollo y aplicación de las técnicas modernas de control, un gran número de tareas y cálculos asociados a la manipulación de las variables ha sido delegado a computadoras, controladores y mecanismos especializados para el

27

\*Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Contacto: maaracelia@gmail.com



logro de los requerimientos del sistema. El control de procesos requiere, en muchos casos, la intervención de personal humano para conseguir determinados objetivos de alto nivel (seguridad, calidad, producción). La automatización exige que el sistema de control pueda reemplazar al operador en esas tareas –o auxiliarle–, para lo que se precisa gran potencia en el manejo del conocimiento que se tiene del proceso y habilidades específicas (Sanz *et al.*, 1991). En este tipo de situaciones, el control inteligente ofrece perspectivas interesantes, ya que es capaz de suministrar metodologías que permiten realizar, de forma automática, algunas de las tareas realizadas típicamente por el ser humano. El principio de todo sistema de control automático es la aplicación del concepto de realimentación o *feedback* (medición tomada desde el proceso que proporciona información del estado actual de la variable que se desea controlar), cuya característica especial es la de mantener al controlador central informado del estado de las variables para generar acciones correctivas cuando sea necesario, como se puede ver en la figura 1.

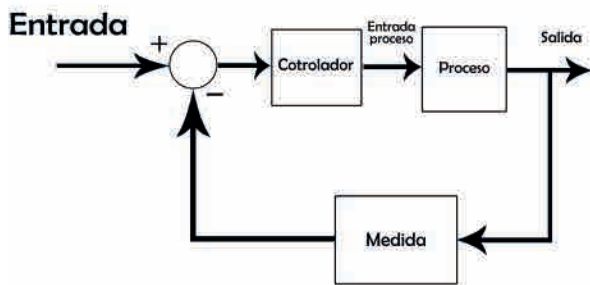


Figura 1. Sistema retroalimentado.



Este mismo principio se aplica en campos tan diversos como el control de procesos químicos, control de hornos en la fabricación del acero, control de máquinas y herramientas, control de variables en el área de la salud, en el control de la trayectoria de un proyectil militar e incluso en los sistemas de navegación de barcos, submarinos, satélites artificiales entre otros.

## ANTECEDENTES

Hasta la Revolución Industrial, el diseño de los sistemas de control se realizaba mediante prueba y error, unido con una gran aportación de intuición ingenieril. De tal manera que era más un arte que una ciencia. En la mitad del siglo XVIII, la matemática fue utilizada para analizar la estabilidad de los sistemas de control realimentado (Orozco y Corella, 2014; Kirk, 1998). Como la matemática es el lenguaje formal de la teoría del control automático, se conoce al periodo previo a ese tiempo como la prehistoria de la teoría del control. De tal forma que hasta finales del siglo XIX el control automático se caracterizó por ser eminentemente intuitivo.

El deseo de mejorar las respuestas transitorias y la exactitud de los sistemas de control, obligó a desarrollar las teorías de los sistemas de control.

A continuación se presenta una breve cronología de las ecuaciones del control automático (Orozco y Corella, 2014):

• 1868

J.C. Maxwell formuló una teoría matemática relacionada con la teoría de control usando el modelo de ecuación diferencial del regulador de Watt y analizó su estabilidad.

• 1892

A.M. Lyapunov estudió la estabilidad a partir de ecuaciones diferenciales no lineales, empleando un concepto generalizado de energía.

• 1922

Minorsky trabajó en controladores automáticos de dirección en barcos y mostró cómo se podría determinar la estabilidad a partir de las ecuaciones diferenciales que describen el sistema. Utilización del primer PID.

• 1932

Harry Nyquist desarrolló un procesamiento relativamente simple para determinar la estabilidad de los sistemas de lazo cerrado sobre la base de la respuesta de lazo abierto con excitación sinusoidal en régimen permanente.

• 1934

Hazen, quien introdujo el término servomecanismos para los sistemas de control de posición, desarrolló el diseño de servomecanismos repetidores capaces de seguir con exactitud una entrada cambiante (control para torretas de cañones).

• 1948

W.R. Evan, trabajando en North American Aviation, presenta la técnica del lugar de raíces.

• 1950

Se desarrolló en Columbia la teoría sobre sistemas de datos muestreados, interviniendo en este estudio J.R. Ragazzini, G. Franklin y L.A. Zadeh, así como E.I. Jury, B.C. Kuo y otros. En este periodo surgió la idea de emplear ordenadores digitales para el control de procesos industriales. El periodo posterior a la Segunda Guerra Mundial puede denominarse como “periodo clásico de la teoría de control”. Se caracterizó por la aparición de los

primeros libros de texto [MacColl, 1945; Lauer, Lesnick y Matdon, 1947; Brown y Campbell, 1948; Chestnut y Mayer, 1951; Truxall, 1955], y por el desarrollo de herramientas de diseño que proporcionaban soluciones garantizadas a los problemas. Estas herramientas se aplicaban mediante cálculos realizados a mano junto con técnicas gráficas.

Se desarrollan los métodos temporales, con el objetivo de solucionar los problemas planteados en aplicaciones aeroespaciales, estos métodos reciben un fuerte impulso con el desarrollo de las computadoras digitales que constituían la plataforma tecnológica necesaria para su implantación, prueba y desarrollo. Los investigadores de la Unión Soviética son los primeros que utilizan el método de descripción interna (Modelo de Estado) en el estudio de los sistemas continuos. Destacan los trabajos de Aizerman, Lerner, Lurie, Pontryagin, La Salle, Popov, Minorsky, Kabala y Bellman.

• 1955

La primera conferencia de la Federación Internacional de Control Automático (IFAC) se realiza en Moscú.

• 1960

Aparecieron tres importantes publicaciones realizadas por R. Kalman y otros coautores. La primera de éstas dio publicidad al trabajo más importante de Lyapunov para el control de sistemas no lineales en el dominio del tiempo. En la segunda analizó el control óptimo de sistemas, suministrando las ecuaciones de diseño para el regulador cuadrático lineal (LQR). En la tercera analizó el filtrado óptimo y la teoría de estimación, suministrando las ecuaciones de diseño para el filtro digital de Kalman.

• 1960

La teoría moderna de control se basa en el análisis y síntesis en el dominio del tiempo. Utilizando variables de estado. Actualmente, la tendencia de los sistemas de control es hacia la optimización y hacia la digitalización total de los controladores. En artículos y bibliografía sobre control es posible observar la gran diversificación del control moderno, como las técnicas de control lineal y no lineal, control óptimo, estocástico, control robusto, control por inteligencia artificial, control adaptable, con amortiguamiento, control de estructura variable, control de eventos discretos, con retardos, entre otros. El avance es vertiginoso tanto en teoría como en la práctica del control.

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA DE CONTROL

El problema de control consiste en tener un proceso que sea representado por un sistema dinámico de ecuaciones (es decir, un sistema de ecuaciones diferenciales, en función del tiempo), regido por una variable de estado dependiente del tiempo ( $x(t)$ ), ésta representa el comportamiento de algún proceso determinado (por ejemplo: naturaleza de temperaturas de un proceso térmico, regulación de un proceso químico, acabado de un maquinado, ángulo de giro de un volante, trayectoria de un objeto, velocidad de algún fluido, etc.), en el cual se requiere un comportamiento adecuado para que el proceso se desempeñe en forma eficiente, minimizando una función costo, cuadrática. Esta función de costo contiene la energía empleada por el estado y la energía empleada por la entrada de control para mantener el comportamiento de la variable de estado. El proceso se encuentra dentro de la famosa "caja negra", no lo podemos ver, sin embargo, sabemos que hay entradas y salidas (figura 2), siendo el objetivo del control asegurarnos de que la variable de estado se comporte adecuadamente (tome los valores apropiados, de acuerdo al proceso).



Figura 2. Representación gráfica general del planteamiento del problema de control.

## ¿Qué es el control automático óptimo?

En otras palabras, el control automático es el mantenimiento de un valor deseado de una variable, en un proceso, dentro de una cantidad o condición, midiendo el valor existente, comparándolo con el valor deseado y utilizando la diferencia para proceder a reducirla (acción de control). En consecuencia, el control automático exige un lazo cerrado de acción y una reacción que funcione sin intervención humana. Se llama control óptimo al que dentro de sus objetivos se encuentra, además de lograr los valores adecuados de la variable a controlar, el de optimizar, es decir, minimiza o maximiza una función criterio  $J$ . En el control óptimo se pretende maximizar ganancias y minimizar costos y energía, según trate el proceso en cuestión a controlar.

El caso más simple es el caso lineal, para el cual el sistema dinámico de ecuaciones que contiene toda la información del proceso toma la forma:

$$\frac{dx}{dt} = A(t)x(t) + B(t)u(t). \quad (1)$$

donde  $x(t) \in R^n$ ,  $u(t) \in R^m$ ,  $A(t)$  es una matriz de dimensión  $n \times n$  y  $B(t)$  es una matriz  $n \times m$ .

Algunas ecuaciones de control para este caso se presentan en Kirk (1998). Y están dadas por:

$$u^*(t) = -R^{-1}(t)B^T(t)K(t)x(t).$$

$$\text{donde } \frac{dK(t)}{dt} = -Q(t) + K(t)B(t)R^{-1}(t)B^T(t)K(t) - K(t)A(t) - A^T(t)K(t)$$

Con función costo a minimizar dada por:

$$J = \frac{1}{2}x^T(t_f)Hx(t_f) + \frac{1}{2} \int_{t_0}^{t_f} (x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t))dt.$$

donde  $H, Q$  son matrices de peso, simétricas, reales, semidefinidas, positivas, y  $R$  es matriz de peso real, simétrica, definida, positiva. Como se puede observar, la función de costo a minimizar contiene la energía del estado dada por  $x^T(t)Qx(t)$  y la energía empleada por el control:  $u^T(t)Ru(t)$ , así como la posición del estado en tiempo final.

El estado óptimo controlado  $x^*(t)$  se obtiene sustituyendo el control óptimo  $u^*(t)$  en la ecuación (1):

$$\frac{dx^*(t)}{dt} = A(t)x^*(t) + B(t)u^*(t),$$

Donde  $u^*(t)$  es el control óptimo, el cual pertenece a un espacio de controles admisibles  $U(t)$ .

Otro aspecto importante a considerar es la presencia de disturbios dentro de los procesos, los cuales quedan fuera del control. Algunos ejemplos pueden ser los factores ambientales, como la humedad y la temperatura, éstos pueden influir en el proceso, si no es considerado algún acondicionamiento especial. Otros factores que quedan fuera de control son los errores de los instrumentos de medición, los cuales están siempre presentes. Todo este tipo de situaciones, y algunas otras, causan disturbios en los procesos, afectándolos, éstos se representan como términos de difusión dentro de la ecuación de estado del sistema. Algunos ejemplos de términos de difusión son los ruidos blancos (caracterizados por ser gaussianos con media cero y varianza  $\sigma^2$ ), los más utilizados, actualmente se cuenta con la representación de otros tipos como los ruidos rosados, cafés, etcétera, dependiendo de la función de distribución a la que se relacionen.

El control para este tipo de sistemas, con presencia de disturbios, es llamado control estocástico. Cuando el sistema dinámico tiene la forma

$$\frac{dx}{dt} = A_0(t) + A(t)x(t) + B(t)u(t) + b \frac{dW}{dt}.$$

Donde  $b = \sqrt{\frac{\varepsilon}{2\gamma^2}}$ , y  $\varepsilon$  es un parámetro que puede tomar diferentes valores, incrementando o decreciendo la intensidad del término de difusión (o ruido blanco), el cual es denotado por  $dW/dt$ . Este planteamiento corresponde al problema *risk-sensitive*, para el cual la solución al problema de control, como se puede ver en Alcorta, Basin y Acosta (2010), está dada por la ley de control óptimo *risk-sensitive*:

$$u^*(t) = -\frac{1}{2}B^T(t)P(t)(X(t) - C(t))$$



Donde el término  $P(t)$  es la solución de la ecuación diferencial matricial:

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{P^T(t)}{2} \left( B(t)B^T(t) - \frac{1}{\gamma^2} I \right) P(t) - A^T(t)P(t) - P(t)A(t) - 2I,$$

$C(t)$  es la solución de la ecuación diferencial vectorial:

$$\frac{dC(t)}{dt} = A^T(t)C(t) + 2C^T(t)P^{-1}(t) + A_0(t)$$

Y la función costo exponencial cuadrática a minimizar está dada por:

$$\begin{aligned} J(X(t), u(t)) &= Es, x \exp\left[\frac{1}{\varepsilon} \int (X^T(t)RX(t) \right. \\ &+ u^T(t)Su(t))dt + (X(T))^T \Phi X(T) \left. \right] \end{aligned}$$

Donde  $E$  indica el valor esperado,  $exp$  indica exponencial,  $I$  es la matriz identidad de dimensiones adecuadas y  $\varepsilon$  es el parámetro que aparece en la ecuación de estado como coeficiente del término de difusión.

Ejemplos de controles incluidos en algunos equipos.

32

Un tostador automático es un sistema de control de lazo abierto, que está controlado por un regulador de tiempo. El tiempo requerido para hacer tostadas debe ser anticipado por el usuario, quien no forma parte del sistema. El control sobre la calidad de la tostada (salida) es interrumpido una vez que se ha determinado el tiempo, el que constituye tanto la entrada como la acción de control.

Un mecanismo de piloto automático y el avión que controla, forman un sistema de control de lazo cerrado (por realimentación). Su objetivo es mantener una dirección específica del avión, a pesar de los cambios atmosféricos. El sistema ejecutará su tarea midiendo continuamente la dirección instantánea del avión y ajustando automáticamente las superficies de dirección del mismo (timón, aletas, etc.), de modo que la dirección instantánea coincida con la especificada. El piloto u operador, quien fija con anterioridad el piloto automático, no forma parte del sistema de control.

En la figura 3 se puede apreciar el control efectuado por el ser humano en una central térmica; en la figura 4 el control se efectúa por medio de robots.



Figura 3. Control manual en una central térmica.



Figura 4. Robots industriales KUKA usados en la producción de alimentos para una panadería.

La ingeniería automática es un área multidisciplinar que se encarga de la concepción y desarrollo de autómatas y de otros procesos automáticos.

La ingeniería automática se encarga de la automatización de procesos técnicos en las siguientes áreas:

- Electrónica e industria eléctrica
- Domótica
- Procesos químicos
- Ingeniería mecánica
- Automovilismo
- Aeronáutica y astronáutica
- Robótica
- Medicina
- Mecatrónica



Dentro de la ingeniería automática se encuentran, entre otras, las siguientes subdisciplinas:

- Instrumentación automática
- Tecnología de sensores
- Regulación automática
- Control de procesos
- Vigilancia
- Etcétera

## INTELIGENCIA ARTIFICIAL

Como se puede ver en Alcorta, Basin y Acosta (2010), los avances en el campo del control automático, aplicados a la inteligencia artificial (IA), la electrónica, sensores, procesamiento de señales, actuadores, etcétera, proporcionan nuevas herramientas para el control de sistemas complejos. La metodología de control es el conjunto de técnicas y procedimientos usados para construir o implementar un controlador para un sistema dinámico. La metodología puede incluir tanto el diseño del procedimiento de control como el tipo de algoritmos/hardware utilizados para su implementación final (Passino, 1993). Para muchos sistemas inteligentes de control, la metodología de diseño del controlador es esencialmente heurística y basada en ciertos principios de la inteligencia artificial o la investigación operativa.

Las metodologías de control inteligente incluyen, por ejemplo, la lógica difusa, sistemas expertos (control basado en reglas), aprendizaje, sistemas de planificación para control, algoritmos de búsqueda, sistemas híbridos, diagnóstico de fallas y reconfiguración, autómatas, redes de Petri, redes neuronales, algoritmos genéticos, etcétera. Algunas de las metodologías de control inteligente incluyen o son una síntesis de las desarrolladas para el control convencional. La IA se puede definir como el estudio de las facultades mentales a través del uso de modelos computacionales. Este término surge en 1950, ideado por un grupo de científicos que estudiaron el cerebro humano como modelo natural, integrando la cibernética y los computadores (McCarthy, Minsky, Newell, Simon). Desde entonces, los investigadores en el campo de la IA han generado ideas y técnicas muy útiles para el control y, a su vez, el desarrollo de la IA se ha visto estimulado en su interacción con el control de procesos. En particular, el control automático puede hacer efectivo el uso de:

- Nuevas técnicas y entornos avanzados de programación
- Técnicas para tratar la heurística
- Nuevos sistemas hardware
- Avances en la electrónica y las comunicaciones

Los procedimientos de modelado, análisis, diseño, simulación, etcétera, de los sistemas de control son un área natural para la aplicación de los métodos de la IA. Hoy en día, la mayoría de los métodos de la IA están bien delimitados y muchos de ellos han sido aplicados con éxito al diseño y control de sistemas. En ocasiones, se ha propuesto una combinación de dos o más de ellos como solución, como se puede apreciar en Albertos y Sala (2004) y Villagrà *et al.* (2010).



# EJEMPLOS DE LA APLICACIÓN DE INTELIGENCIA ARTIFICIAL

El proyecto de automóvil autónomo de Google y la función de “piloto automático” de Tesla son dos casos de inteligencia artificial que han aparecido en las noticias últimamente, y que forman parte de nuestra vida cotidiana.



Figura 5. IA en automóviles.

34

El objetivo es que, eventualmente, el automóvil pueda “mirar” el camino por delante y tomar decisiones basadas en lo que ve, aprendiendo durante el proceso.

Otro ejemplo es Google Photosel, que permite buscar sus ‘fotos’ en las fotos. Facebook reconoce las caras, al igual que *Snapchat Face Swap*.



Figura 6. IA en reconocimiento de imágenes.

Se trataba de una aplicación que consiste en proporcionar ayuda a personas con discapacidad visual, este prototipo inicial reconoce lo que está delante del usuario y luego se lo describe de nuevo. Por

supuesto, para los especialistas en marketing los usos podrían ser múltiples, desde la búsqueda de contenido hasta experiencias innovadoras de los clientes. Google cuenta también con este sistema, por ejemplo, si haces una búsqueda con la palabra “gato”, te saldrán solamente imágenes de gatos.

El paso final del desarrollo de AI es construir sistemas que puedan formar representaciones sobre ellos mismos. En última instancia, el objetivo de los investigadores de IA no sólo es comprender la conciencia, sino construir máquinas que la tengan.

## CONCLUSIONES

El área de control automático ha demostrado sus múltiples aplicaciones en diversos aspectos de la vida cotidiana, lo cual ha llevado a impulsar la tecnología en todas las áreas como la industrial, medio ambiente, espacial, salud, etcétera. Abriéndose cada vez más oportunidades para llevar a cabo la aplicación y desarrollo de nuevas técnicas de control que, junto con el desarrollo de la IA, impulsan extraordinariamente los avances científicos y tecnológicos. Siendo cada vez más los procesos complejos que se pueden controlar y automatizar, haciendo la vida más cómoda y dando más condiciones para conservar la salud. Razón por la cual cada vez se requiere de más personal altamente motivado y capacitado en ésta área.

## REFERENCIAS

- Albertos, P., y Sala, A. (2004). El control difuso: una metodología integradora. *RIAI* 1(2): 22-31.
- Alcorta, M.A.G., Basin, M.V., y Acosta, G.S. (2010). Risk-sensitive approach to optimal filtering and control for linear stochastic systems. *IJICIC*. Doi: 10.1109/IJICIC.2008.659.
- Kirk, D.E. (1998). *Optimal Control Theory. An Introduction*. Mineola N.Y. USA.: Ed. Dover Publications Inc.
- Orozco, L., y Corella, J. (2014). *Historia de los sistemas de control*. Universidad de las Fuerzas Armadas, Ecuador. Disponible en: <http://image.slidesharecdn.com/deber2historia141110223929-conversion-gate01/95/historia-de-los-sistemas-de-control-1-638.jpg?cb=1415659306>.
- Passino, K.M. (1993). Bridging a gap between conventional and intelligent control. *IEEE Control Systems Magazine*. 13(3): 12-18. Doi: 10.1109/37.214940.
- Santos, M. (2011). Aplicaciones exitosas de control inteligente a casos reales. *Revista Iberoamericana de Automática e Informática Industrial*. Elsevier. 00: 1-8.
- Sanz, R., Jiménez, A., Galán, R., et al (1991). Puente. Introducción al control inteligente de procesos. *Informática y Automática*. 24(1).
- Villagrà J, Milanés V, Pérez J, et al (2010). Control basado en PID inteligentes: aplicación al control robusto de velocidad en entornos urbanos. *RIAI* 7(4): 44-52.



# SECCIÓN ACADÉMICA

**Cálculo de regiones de estabilidad  
robusta para sistemas inciertos mediante  
herramientas de positividad de funciones**

**Propiedades físicas del mesón sigma en el  
vacío**

**Recubrimientos nanoestructurados  $\text{SiO}_2$ -  
 $\text{TiO}_2$  en aleaciones de aluminio 6061-T6**

**Sobre el análisis de la forma de los datos: un  
nuevo paradigma en ciencia de datos**

**Optimización matemática multiobjetivo: un  
procedimiento metaheurístico inteligente  
aplicado a la segmentación de mercado en  
una empresa embotelladora**

35



# Cálculo de regiones de estabilidad robusta para sistemas inciertos mediante herramientas de positividad de funciones

Mario Alberto López Vega\*, César Elizondo González\*,  
Cornelio Posadas Castillo\*, Efraín Alcorta García\*

DOI: / 10.29105/cienciauanl22.96-1

## RESUMEN

En este trabajo se propone un algoritmo para el diseño de un controlador de sistemas lineales con incertidumbre paramétrica. El punto de partida es una herramienta matemática para la solución de problemas de positividad de funciones multivariadas polinómicas. El algoritmo propuesto está basado en un resultado para la estabilidad de sistemas lineales invariantes en el tiempo (Linear Time Invariant, LTI) con incertidumbre en sus parámetros. El algoritmo permite encontrar una familia de controladores que garantizan estabilidad robustamente. La solución propuesta, así como sus ventajas, son mostradas mediante un ejemplo.

Palabras clave: positividad, estabilidad robusta, polinomio característico, controlador, sistema lineal.

Sistemas industriales son frecuentemente modelados mediante ecuaciones diferenciales con la finalidad de diseñar controladores que permitan llevar las variables requeridas del proceso a niveles deseados. Desde el punto de vista práctico, los parámetros asociados al modelo no se pueden conocer con precisión y, generalmente, hay al menos algunos de estos parámetros que serán especificados a pertenecer a un intervalo de valores. Esto es conocido como incertidumbre paramétrica y representa un problema tanto para el análisis como para el diseño de sistemas de control.

El problema de estabilidad robusta con incertidumbre paramétrica no es un problema nuevo, existen varios enfoques que buscan mejorar el diseño de controladores robustos y las técnicas de modelado

## ABSTRACT

*An algorithm for the design of a linear systems controller with parametric uncertainty is proposed. The starting point is a mathematical tool for the solution of positivity problems of multivariate polynomial functions. The proposed algorithm is based on a result for the stability of Linear Time Invariant (LTI) systems with uncertainty in its parameters. The algorithm allows finding a family of controllers that guarantee stability robustly. The proposed solution, as well as its advantages, are shown by an example.*

*Keywords: positivity, robust stability, characteristic polynomial, controller, linear system.*

(Ackermann y Bartlett, 1993; Barmish, 1994; Bhattacharyya, Datta y Keel, 2009).

Ackermann y Bartlett (1993) proponen un esquema en el espacio de parámetros que resulta impráctico para un número de parámetros mayor. Barmish (1994) muestra una serie de herramientas que permiten análisis, pero no presenta un método sistemático de diseño. La propuesta más actual para solucionar el problema de diseño fue presentada por Bhattacharyya y su grupo (Bhattacharyya, Datta y Keel, 2009; Keel y Bhattacharyya, 2008; Knap, Keel y Bhattacharyya, 2011), donde se propone el diseño robusto de controladores PID para sistemas lineales a partir de datos entrada-salida. Por un lado, no requiere el modelo de forma explícita, pero por otro sólo se considera controladores PID.

\* Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Contacto: malove1985@gmail.com

En este tipo de problema se parte de un sistema nominal estable, es decir, con parámetros fijos, y después se analiza la incertidumbre en los parámetros del sistema o las cotas de dichos parámetros. La solución radica en saber si el sistema con incertidumbre es o no estable en el intervalo de valores que lo integran. Claramente, en esta formulación, el sistema nominal es un miembro dentro de las cotas preestablecidas. En otras palabras, se tiene una familia de sistemas en el dominio del tiempo y el sistema nominal es miembro de esa familia de sistemas (Yedavalli, 2013).

El considerar la presencia de la incertidumbre en el diseño de controladores robustos sin sacrificar el desempeño del sistema es todo un reto. Existen diversas estrategias que enfrentan la incertidumbre paramétrica en el diseño de controladores (Mohsenizadeh, Keel y Bhattacharyya, 2014; Mercader y Banos, 2017).

En este trabajo se propone una solución para el diseño de controladores de sistemas lineales invariantes en el tiempo que tienen incertidumbre paramétrica. La propuesta está basada en resultados previos del grupo. Debido a la naturaleza del problema, se obtiene una familia de controladores que satisfacen robustamente el requisito de estabilidad. El resultado es mostrado mediante un ejemplo.

El hecho de que se obtenga una familia de controladores representa una ventaja del enfoque propuesto, pues nos deja la libertad para buscar, dentro de esta familia, el controlador que, además, cumpla con un criterio adicional de desempeño.

Note que, aunque se requiere como dato el modelo de sistema, el resultado no se limita a una estructura de controlador dado, pudiendo ser utilizada de manera abierta o bien con diferentes tipos o estructuras de controladores.

El resto del trabajo está organizado como sigue: en la sección preliminares se presenta la herramienta matemática “Descomposición de signo”, disponible para analizar la positividad de funciones polinómicas multivariadas, así como un resultado para determinar la estabilidad robusta de sistemas inciertos. En la siguiente sección se describe el resultado principal, es decir, el algoritmo para diseño de controladores. Un

ejemplo de aplicación es presentado, en él se clarifican los diferentes aspectos discutidos a lo largo del trabajo. Finalmente se presentan las conclusiones.

## PRELIMINARES

### Descomposición de signo

Descomposición de signo es una herramienta matemática que mediante el análisis de puntos extremos permite determinar, en condiciones necesarias y suficientes, la positividad robusta de funciones multivariadas polinómicas dependientes de parámetros.

*Definición 1.* Sea  $f: \mathfrak{R}^1 \rightarrow \mathfrak{R}$  una función continua y sea  $Q \subset P \subset \mathfrak{R}^1$  un subconjunto convexo, se dice que  $f(q)$  tiene descomposición de signo en  $Q$  si existen dos funciones acotadas no-decrecientes  $f_n(\cdot) \geq 0$ ,  $f_p(\cdot) \geq 0$ , tales que  $f(q) = f_p(q) - f_n(q) \forall q \in Q$ . Dichas funciones se llamarán: la parte positiva de la función  $f_p(q)$  y la parte negativa de la función  $f_n(q)$  (Elizondo, 1999; 2000).

$$\begin{aligned} f(q) &= f_p(q) - f_n(q) \forall q \in Q, \\ f_p(\cdot) &\triangleq \text{Parte positiva de } f(\cdot), \\ f_n(\cdot) &\triangleq \text{Parte negativa de } f(\cdot) \end{aligned}$$

#### Representación $(f_n, f_p)$

Cuando una función continua  $f: \mathfrak{R}^1 \rightarrow \mathfrak{R}$  se descompone en  $Q \subset P \subset \mathfrak{R}^1$ , en sus partes positiva y negativa,  $f_p(\cdot)$  y  $f_n(\cdot)$ , realmente se está haciendo una transformación de  $\mathbb{R}^1$  a  $\mathbb{R}^2$ , la representación gráfica de la función en un plano  $(f_n, f_p)$  es de utilidad para entender más fácilmente las propiedades que poseen las partes positiva y negativa de la función, para lo cual se establece la siguiente proposición. Si una función con descomposición de signo en  $Q$  es igual a cero para todo  $q$  elemento de  $Q$ , implica que  $f_p(q) = f_n(q) \forall q \in Q$ , y su representación gráfica en el plano  $(f_n(q), f_p(q))$  es una línea recta a  $45^\circ$  que contiene al origen, a la cual nos referiremos como la recta a  $45^\circ$ , los puntos arriba de ella corresponden a la representación gráfica de funciones con valor positivo y obviamente los de abajo a negativo.

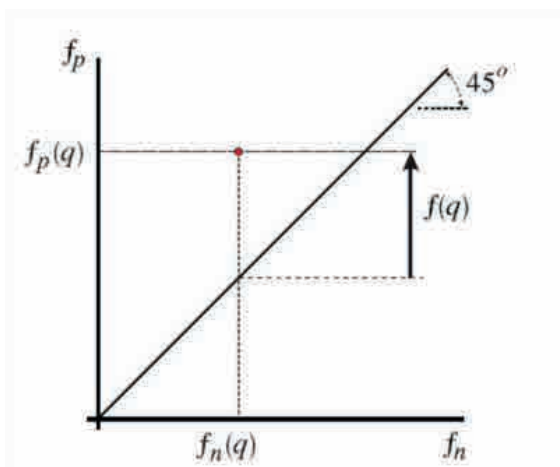


Figura 1. Plano  $(f_n, f_p)$

Debe notarse que independientemente del número de parámetros de la función multivariable polinómica, la función siempre será representada en  $\mathbb{R}^2$ , representada en el plano  $(f_n(q), f_p(q))$  (figura 1).

*Criterio de estabilidad de C. Elizondo*

Este criterio de estabilidad presenta una tabla a partir de la cual se determina el número de raíces de un polinomio real que se encuentran en el semiplano derecho del plano complejo. Dicha tabla se fundamenta en el principio del argumento, índices de Cauchy, cadenas de Sturm y cadenas de Sturm modificadas. La tabla presenta algunas ventajas: las operaciones numéricas se reducen con respecto a otros criterios y los coeficientes son funciones multivariables polinómicas cuya positividad robusta se obtiene en condiciones necesarias y suficientes utilizando descomposición de signo (Elizondo, 1999; 2000; 2001; 2011), determinando entonces la estabilidad robusta para sistemas LTI con incertidumbre paramétrica.

**Teorema 2.3.1.** Dado un polinomio  $p(s) = C_0 + C_1s + C_2s^2 + \dots + C_{n-1}s^{n-1} + C_ns^n$  con coeficientes reales, el número de raíces a la derecha del plano de los complejos es igual al número de variaciones de signo en la columna  $\sigma$ , en el siguiente arreglo (Elizondo, 2001).

$\sigma_1$	$C_n$	$C_{n-2}$	$C_{n-4}$	...
$\sigma_2$	$C_{n-1}$	$C_{n-3}$	$C_{n-5}$	...
$\sigma_3$	$e_{3,1}$	$e_{3,2}$	...	
$\sigma_4$	$e_{4,1}$	$e_{4,2}$	...	
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$		
$\sigma_{(n-1)}$	$e_{(n-1,1)}$			
$\sigma_n$	$e_{(n,1)}$			
$\sigma_{(n+1)}$	$e_{(n+1,1)}$			

$$e_{i,j} = (e_{i-1,1}e_{i-2,j+1} - e_{i-2,1}e_{i-1,j+1}), \forall 3 \leq i \leq n+1,$$

$$e_{i,j} = C_{n+1-i-2(j-1)} \forall i \leq 2,$$

$$\sigma_i = \text{Sign}(e_{i,1}) \forall i \leq 2,$$

$$\sigma_i = \text{Sign}(e_{i,1}) \prod_{j=1}^{(i+1-m)/2} \text{Sign}(e_{(m+2(j-1)),(1)}) \forall i \geq 3)$$

La metodología de cálculo del signo  $\sigma_i$  de un renglón es mucho más sencilla que lo que aparenta la expresión matemática que lo determina: el signo  $\sigma_i$  de un renglón se determina multiplicando el signo de  $e_{i,1}$  por el signo del elemento inmediato superior a éste, es decir, el de  $e_{(i-1),1}$  y por los signos de los elementos superiores de la columna e "brincando" de dos en dos.

En el caso de que un elemento  $e_{i,1}$  sea cero, entonces se sustituye el cero por un  $\epsilon > 0$  y se continúa el cálculo de la tabla. En caso de que todos los elementos  $e_{i,j}$  de un renglón sean de valor cero, entonces se sustituye el renglón completo por la derivada del renglón superior.

Debe notarse que cada uno de los elementos  $e_{i,j}$  fueron elaborados sin utilizar la división empleada en el criterio de Routh, por lo tanto los elementos  $e_{i,j}$  en el caso de incertidumbre paramétrica son funciones multivariables polinómicas.

En la tabla I se muestra cómo el criterio Elizondo González tiene ventajas sobre el conocido criterio de Hurwitz.

Tabla I. Número de operaciones de criterios de estabilidad.

Grado N	Hurwitz		C. Elizondo	
	×	+ o -	×	+ o -
3	4	1	2	1
4	9	2	5	2
5	66	18	9	4
6	193	45	14	6
7	780	145	20	9

# METODOLOGÍA

Las herramientas matemáticas descritas anteriormente pueden aplicarse para encontrar una región de controladores PI que estabilizan a un sistema LTI con incertidumbre paramétrica.

Se considera cualquier sistema LTI en forma general con incertidumbre paramétrica en cascada con un controlador PI y retroalimentación unitaria. Se obtiene la función de transferencia correspondiente a la familia de sistemas y al conjunto de controladores PI generados por la incertidumbre paramétrica en lazo cerrado y a continuación se analiza el polinomio característico de la función de transferencia. Es importante establecer un porcentaje de incertidumbre para los parámetros de la planta, el polinomio característico a analizar es una función multivariable polinómica que depende de parámetros acotados, algunas de estas cotas pudieran ser valores negativos. Por lo tanto, la “descomposición de signo” comienza con una transformación de coordenadas de los parámetros acotados a un conjunto de parámetros matemáticos tal que todos los vectores de los nuevos parámetros estén contenidos en un cono convexo positivo. Para agregar de manera sencilla un desempeño al conjunto de controladores que estabilizan una familia de sistemas, se desea que la parte real del polinomio característico esté dentro de una región definida por un segmento, generándose dos nuevos polinomios característicos a analizar. Usando el teorema de estabilidad relativa, se analizan la estabilidad robusta de los polinomios  $p(s-a)$  y  $p(-s-b)$ . Entonces, la estabilidad robusta de cada polinomio  $p(s-a)$  y  $p(-s-b)$  será analizada utilizando el reciente criterio de estabilidad (Elizondo C., 2001), y aplicando “descomposición de signo” se probará la positividad robusta de los elementos  $e_{i,1}$ . Si cada elemento  $e_{i,1}$  es robustamente positivo, entonces la columna entera será positiva y el polinomio del sistema analizado será robustamente estable.

La metodología descrita anteriormente da una explicación del funcionamiento del resultado principal de este trabajo. A continuación se define el algoritmo capaz de establecer un conjunto de controladores robustos que dan estabilidad robusta a un sistema LTI con incertidumbre paramétrica en una región predeterminada.

# RESULTADOS

A continuación se presenta el resultado principal de este artículo, un algoritmo que permite encontrar una familia de controladores que garantizan estabilidad robusta. Para una mejor comprensión del resultado principal, se definen las variables y términos utilizados a lo largo del algoritmo:  $K^*(k_1^*, k_2^*)$ : punto de partida del algoritmo en una región robustamente estable donde inicia la búsqueda de las cotas de los parámetros  $k_1^*$  y  $k_2^*$ , respectivamente.

$\varepsilon$ : medida propuesta para analizar el tamaño de las cajas o regiones de estabilidad robusta.

$\alpha$ : tolerancia que el algoritmo utiliza para finalizar y mostrar resultados.

$k_{1RB_1}$ : primera cota lateral derecha para el parámetro  $k_1$ .

$k_{1LB_1}$ : primera cota lateral izquierda para el parámetro  $k_1$ .

$\nu_1$ : medida que indica el número de intervalos a analizar en el primer segmento encontrado (en función de la tolerancia  $\varepsilon$ ).

$k_{i2_{em}}^*$ : cota mínima estimada para el parámetro  $k_2$ .

$k_{i2_{eM}}^*$ : cota máxima estimada para el parámetro  $k_2$ .

$A_i, B_i, C_i, D_i$ : vértices definidos por los valores de las cotas laterales y las cotas inferior y superior.

## Descripción del algoritmo

El algoritmo hace un análisis de estabilidad robusta en el “punto de partida” para después continuar con la búsqueda de la región en la cual se satisface estabilidad robusta y que se describe a continuación:

1. Se propone una medida inicial de retícula a analizar  $\varepsilon$  y se define la tolerancia  $\alpha$  con la que finaliza el algoritmo.

2. Partiendo de un  $K^*(k_1^*, k_2^*)$  que le da estabilidad robusta relativa al sistema, se hace la búsqueda de la primera cota lateral derecha  $k_{1RB_1}$ , para la cual el sistema es robustamente estable en el segmento  $[k_1^*, k_{1RB_1}]$ , manteniendo  $k_2 = k_2^*$  (ver figura 2-a).

3. Con el intervalo  $[k_1^*, k_{1RB_1}]$  y el valor propuesto de  $\varepsilon$  se obtiene el número inicial  $\nu_1$  de intervalos a analizar,  $\nu_1$  es el entero inmediato mayor a  $\frac{k_{1RB_1} - k_1^*}{\varepsilon}$ .

4. Calcular el ancho de retícula a analizar  $\varepsilon_1 = \frac{k_{1RB_1} - k_1^*}{\nu_1}$ .

5. Analizar la satisfacción de tolerancia. Si  $\varepsilon_1 \leq \alpha \varepsilon$  ir al paso 9, de lo contrario continuar con el paso 6.

6. Calcular los  $\nu_1$  nuevos “puntos de partida de análisis”  $(k_1^{**} + n\varepsilon_1, k_2^{**}) \forall n=0, 1, 2, \dots, \nu_1$ . Obteniendo así  $\{K_1^*(k_{11}^*, k_{12}^*), K_2^*(k_{21}^*, k_{22}^*), \dots, K_{\nu_1}^*(k_{\nu_1 1}^*, k_{\nu_1 2}^*)\}$ .

7. Para cada nuevo punto de partida de análisis, manteniendo constante  $k_2^*$ , se obtienen las cotas mínima y máxima estimadas para el parámetro  $k_2^*$ :  $k_{i2_{em}}^*$  y  $k_{i2_{eM}}^*$  respectivamente (figura 3b).

8. Regresar al paso 2 calculando el punto de partida de análisis  $K^*$  ( $k_1^*, k_2^*$ ) de la siguiente manera:

$$k_1^* = k_{v_1 1}, k_2^* = \frac{k_{v_1 2em} + k_{v_1 2eM}}{2} \quad (\text{figura 3c}).$$

9. Analizar la estabilidad robusta en el conjunto de cajas rectangulares con lados paralelos a los ejes  $K_1$  y  $K_2$  con vértices  $A, B, C, D$ , definidos de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} k_{Ai1} &= k_{i1}^*, \\ k_{Ai2} &= \max\{k_{i2em}, k_{(i+1)2em}\}, \\ k_{Bi1} &= k_{(i+1)1}^*, \\ k_{Bi2} &= k_{Ai2}, \\ k_{Ci1} &= k_{Bi1}, \\ k_{Ci2} &= \min\{k_{i2eM}, k_{(i+1)2eM}\}, \\ k_{Di1} &= k_{Ai1}, \\ k_{Di2} &= k_{Ci2} \end{aligned}$$

(figura 3d).

10. Aplicar "partición de cajas" a cada caja del paso anterior que no satisfaga las condiciones de estabilidad. Cada una de estas cajas se parte equidistantemente en cuatro subcajas, a cada una se le aplica el análisis de estabilidad robusta. El procedimiento de partición se aplica iterativamente en cada subcaja que no satisfaga las condiciones de estabilidad. El procedimiento termina cuando el ancho o alto de la subcaja a analizar es menor o igual a  $\alpha\epsilon$  (figura 2e y 2f).

## 40

### Ejemplo de aplicación

A continuación se muestra un ejemplo de aplicación para el diseño de un controlador robusto. Utilizando la herramienta "descomposición de signo" se prueba la positividad de todas las funciones multivariables polinómicas de la columna  $\sigma$  en el criterio de estabilidad de César Elizondo, descrito anteriormente. Al no haber cambio de signo en la columna  $\sigma$ , es decir, probar que todas las funciones son positivas, se establece una región en el espacio de parámetros del controlador y se comprueba la estabilidad robusta del sistema con incertidumbre paramétrica. Se presenta como ejemplo un motor de inducción, conocido por su robustez, confiabilidad y eficiencia, que además es objeto de varios trabajos de investigación en diferentes áreas de ingeniería. El modelo dinámico del motor de inducción puede expresarse y simplificarse como en Chebre, Zerikat y Bendaha (2007), y se puede representar mediante el diagrama de bloques mostrado en la figura 3.

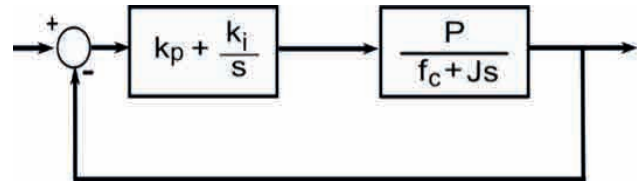


Figura 2 Sistema con controlador tipo PI y retroalimentación unitaria.

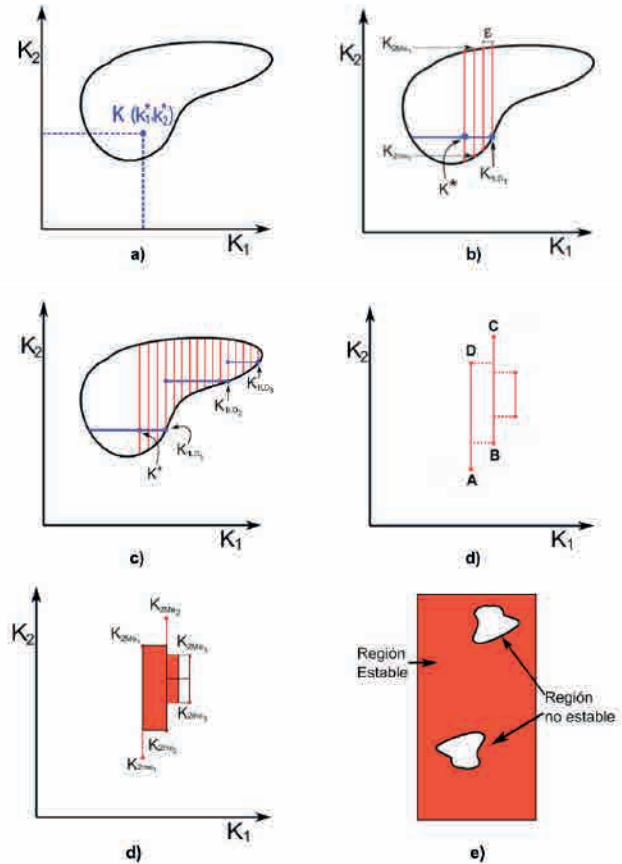


Figura 3. Descripción del algoritmo.

De acuerdo a la nomenclatura de la teoría de control robusta, tenemos las siguientes funciones de transferencia con los siguientes parámetros para el sistema y un controlador tipo PI:

$$G(s) = \frac{P}{f_c + Js} = \frac{q_1}{q_2 + q_3s}$$

$$C(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = q_4 + \frac{q_5}{s}$$

El polinomio característico en lazo cerrado es:

$$P(s, q) = q_1s^2 + (q_2 + q_3q_4)s + q_3q_5$$

Los parámetros del sistema con 5% de incertidumbre son:  $q_1 \in (2.1, 1.9)$ ,  $q_2 \in (0.001083, 0.001197)$ ,  $q_3 \in (0.02945, 0.03255)$ .



Para este ejemplo se requiere la construcción de un conjunto de controladores que permitan estabilidad robusta, es decir, las raíces reales del polinomio característico en lazo cerrado deben situarse en el semiplano izquierdo del plano complejo.

Se analiza la estabilidad robusta del sistema en lazo cerrado de acuerdo al polinomio característico  $P(s,q)$ . Por el criterio de estabilidad se obtiene la tabla correspondiente al polinomio y usando la descomposición de signo se analiza positividad robusta de cada uno de los elementos  $e_i$ .

Los coeficientes de la tabla se presentan a continuación:

$$\begin{aligned} C_2(q) &= q_1 \\ C_1(q) &= (q_2 - 4q_1 + q_3q_4) \\ C_0(q) &= (4q_1 - 2q_2 - 2q_3q_4 + q_3q_5) \\ e_{3,1}(q) &= \begin{pmatrix} -16q_1^2 + 12q_1q_2 + 12q_1q_3q_4 - 4q_1q_3q_5 - \\ (2q_2^2 - 4q_2q_3q_4 + q_2q_3q_5 - 2q_3^2q_4^2 + q_3^2q_4q_5) \end{pmatrix} \end{aligned}$$

El conjunto de controladores que satisfacen estabilidad robusta al sistema con incertidumbre paramétrica se muestra en la figura 4.

## CONCLUSIONES

En este artículo se muestran las diversas herramientas para analizar la positividad robusta de funciones multivariadas polinómicas y se da una aplicación en el área de ingeniería de control.

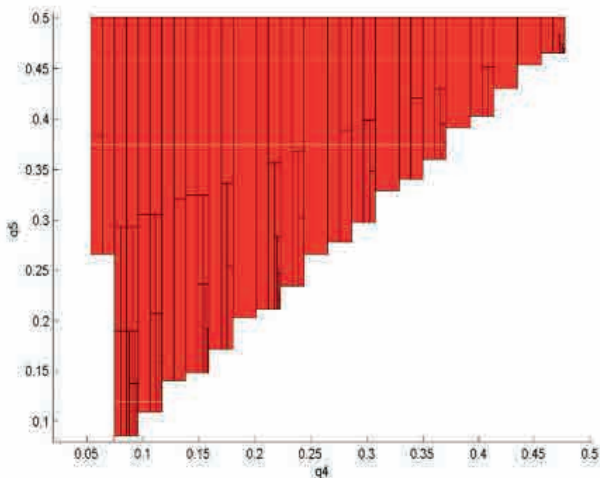


Fig. 4 Región de estabilidad de estabilidad robusta para el espacio de parámetros del controlador.

Se propone un enfoque para la construcción de un conjunto de controladores PI mapeando el problema original a un problema de positividad robusta, el cual se resuelve con la herramienta matemática “descomposición de signo”, obteniendo estabilidad robusta de sistemas LTI con incertidumbre paramétrica.

Si el número de parámetros del sistema se incrementa, aumentará también el número de operaciones, y por lo tanto el tiempo en obtener una región de estabilidad. En general, el costo computacional depende del sistema a analizar y la incertidumbre en sus parámetros.

## REFERENCIAS

- Ackermann, J., y Bartlett, A. (1993). *Robust Control Systems with Uncertain Physical Parameters*. Springer.
- Barmish, R.B. (1994). *New Tools for Robustness of Linear Systems*. New York, NY: Macmillan.
- Bhattacharyya, S.P., Datta, A., y Keel, L.H. (2009). *Linear Control Theory, Structure, Robustness and Optimization*. Boca Raton, London, New York: Taylor and Francis Group.
- Chebre, M., Zerikat, M., y Bendaha, Y. (2007). *Adaptation des Paramètres d'un Contrôleur PI par un FLC Appliqué à un Moteur Asynchrone*. 4th International Conference on Computer Integrated Manufacturing CIP, 2007, 03-04, Setif, Algeria.
- Elizondo, C. (1999). *Estabilidad y controlabilidad robusta de sistemas lineales con incertidumbre multilineal*. Programa Doctoral de la Facultad de Ingeniería Mecánica y Eléctrica de la Universidad Autónoma de Nuevo León.
- Elizondo, C. (2000). *Necessary and Sufficient Conditions for Robust Positivity of Polynomic Functions Via Sign Decomposition*, *Robust Control*. Design IFAC ROCOND 2000, Prage Czech Republic.
- Elizondo, C. (2001). *A new stability criterion on space coefficients*. *Conferences on Decision and Control IEEE*. Orlando Florida, USA.
- Elizondo-González, C. (2011). *Parametric Robust Stability*, Recent Advances in Robust Control Andreas Müller. *IntechOpen*. DOI: 10.5772/24460.
- Keel, L.H., y Bhattacharyya, S.P. (2008). *Fixed Order Multivariable Controller Synthesis: A New Algorithm*, *Proceedings of the 47th Conference on Decision and Control*. Cancún, México.
- Knap, M.J., Keel, L.H., y Bhattacharyya, S.P. (2011). *Robust Hurwitz stability via sign-definite decomposition*. *IEEE Transactions on Automatic Control*. 56(1).
- Mercader, P., y Banos, A. (2017). *A PI tuning rule for integrating plus dead time processes with parametric uncertainty*. *ISA transactions*.
- Mohsenizadeh, D.N., Keel, L.H., y Bhattacharyya, S.P. (2014). *An Equivalent Plant Representation for Unknown Control Systems*. In: 7th ASME Dynamic Systems and Control Conference. San Antonio.
- Yedavalli, R.K. (2013). *Robust Control of Uncertain Dynamic Systems: A Linear State Space Approach*. Springer.

RECIBIDO: 14/02/2018  
ACEPTADO: 22/05/2018



# Propiedades físicas del mesón sigma en el vacío

José Rubén Morones Ibarra\*, Mónica del Carmen Menchaca Maciel\*

DOI: / 10.29105/cienciauanl22.96-2

## RESUMEN

Se calcula la masa física del mesón escalar  $s$  utilizando su función espectral. La función espectral es calculada considerando que la partícula sigma se acopla a un par de piones virtuales  $\pi^+-\pi^-$ . El propagador de  $\sigma$  es evaluado después de calcular la autoenergía, cuya parte real es dada por una integral divergente que requiere ser regularizada. Al realizar la regularización mediante el proceso de una substracción simple en la relación de dispersión, se obtiene una expresión analítica cerrada para la parte real de la autoenergía, lo que permite evaluar la función espectral en una forma cerrada. Definiendo la masa física del mesón como la magnitud del cuadrimomento  $|k|$  para la cual la función espectral  $S(k)$  obtiene su máximo valor, se obtiene el valor de  $600 \text{ MeV}$  para la masa del  $\sigma$ . Este valor es consistente con el valor experimental reportado en las tablas para la masa de esta partícula. Adicionalmente, también se obtiene que el ancho de esta resonancia tiene un valor alrededor de  $220 \text{ MeV}$ . Un reporte muy reciente establece el valor de  $441 \text{ MeV}$  para la masa del sigma. Tomando este valor para  $m_s$ , obtenemos en nuestros cálculos que la masa física es de  $400 \text{ MeV}$ .

Palabras clave: mesón sigma, mesones escalares, mesones ligeros.

El interés por estudiar las propiedades de los hadrones tanto en el vacío como en el medio nuclear se ha incrementado notablemente durante las últimas dos décadas debido a los importantes desarrollos tecnológicos en el campo de los aceleradores y detectores de partículas. La posibilidad de reproducir en el laboratorio las condiciones que se presentaron en el universo en los primeros microsegundos después del *Big Bang* ha generado una intensa actividad científica en este campo (CERN, s.a; Jacak y Muller, 2012; Fodor, 2012; Morita *et al.*, 2000).

El estudio de las partículas que interactúan mediante la fuerza fuerte se realiza mediante la cromodinámica cuántica (CDC). Esta teoría ha sido muy exitosa para explicar los fenómenos a elevadas energías, sin embargo, presenta grandes dificultades para resolver sus ecuaciones a bajas energías. La CDC es una de las teorías fundamentales de la física, siendo sus gra-

## ABSTRACT

*The present research calculates the physical mass of the sigma scalar meson using the spectral function. The spectral function was obtained considering the sigma particle couples with a pair of virtual pions. Sigma's propagator was then evaluated, which its real part is a result of a divergent integral, which requires to be regularized. Afterwards, with a simple subtraction, a closed analytical expression of the real part of the autoenergy is obtained, which then is used to evaluate the closed form of the spectral function. Defining the meson's physical mass as the magnitude of the quadrimomentum in which the spectral function has its maximum value, the mass of the sigma meson is obtained, which is  $600 \text{ MeV}$ . This value agrees with the experimental values reported in literature. Additionally, the width of the resonance was calculated, as  $220 \text{ MeV}$ . Recent studies established the sigma meson's mass as of  $441 \text{ MeV}$ , using this information in our method a physical mass of  $400 \text{ MeV}$  was obtained.*

Keywords: sigma meson, scalar mesons, light mesons, spectral function.

dos de libertad los quarks y los gluones. Se espera que con ella se puedan describir los procesos de las partículas que interactúan mediante la fuerza fuerte. No obstante, cuando se estudian los hadrones, que son partículas formadas por quarks, la CDC se vuelve inmanejable (Bowmana *et al.*, 2004).

La cromodinámica cuántica predice la liberación de los quarks a elevadas temperaturas o altas densidades de la materia. En estos procesos de colisiones ultrarrelativistas entre iones pesados que actualmente se llevan a cabo en laboratorios como el European Organization for Nuclear Research (CERN, por sus siglas en francés) o el Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) en Estados Unidos. En el RHIC se reportó, en 2005, la observación de un nuevo estado de la materia: el plasma de quarks y gluones (PQG) (Pasechnik y Sumbera, 2017).

\* Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Contacto: rubenmorones@yahoo.com.mx

Para estudiar las propiedades físicas de este nuevo estado de la materia, es importante comprender el comportamiento del mesón  $\sigma$  en la materia nuclear. Es por eso que la partícula escalar sigma juega un papel importante en esta búsqueda de la transición de fase de la materia nuclear al PQG. Éste es uno de los motivos por los cuales su estudio ha atraído la atención de investigadores de todo el mundo (Ayala *et al.*, 2009; Albaladejo y Oller, 2012).

El estudio del mesón escalar sigma es interesante debido a su carácter controversial. Algunos suponen que es una resonancia de dos piones, es decir, que es generada por la interacción y fusión de dos piones. Otros grupos de investigadores aseguran que los dos piones dentro de la partícula sigma han perdido su identidad, resultando en una estructura de cuatro quarks (Kenkyu, 2001; Close y Tornqvist, 2002).

Un gran número de trabajos se han publicado para calcular la masa y el ancho del mesón escalar sigma tanto en el vacío como en la materia nuclear sometida a condiciones extremas de elevada densidad (Albaladejo y Oller, 2012; Parganlija y Giacosa, 2017). La importancia de este estudio radica en que nos ayuda a comprender y analizar los resultados de los experimentos de choques entre iones pesados ultrarrelativistas. Estos experimentos se están realizando actualmente en el CERN y en el Large Hadron Collider (LHC) (CERN, s.a; Jacak y Muller, 2012).

En este trabajo hemos calculado la masa y el ancho del mesón escalar sigma en el vacío usando la lagrangiana de interacción introducida en Wolf, Friman y Soyeyur (1998). Una extensión de este trabajo sería el cálculo de estas cantidades físicas en el medio nuclear para tener un estudio comparativo entre ambas condiciones, en el medio nuclear y en el vacío.

## **LAS PARTÍCULAS ELEMENTALES**

Entre las propiedades físicas importantes de una partícula subnuclear inestable se encuentran su masa y su anchura. Definir la masa de una partícula de una manera operativa y que no dé lugar a situaciones ambiguas es una de las preocupaciones de los físicos de partículas elementales. Sin embargo, la forma de definir la masa en la escala de las partículas subnucleares no es única (Shiomi y Hatsuda, 1994; Kim *et al.*, 1999; Jean, Piekarewicz y Williams, 1994; Dutt-Mazumder, Kundu y De, 1996).

El concepto de función espectral (Asakawa *et al.*, 1992; Hermann, Friman y Nörenberg, 1993) ha probado ser de gran utilidad para describir el comportamiento de las partículas en el medio nuclear, y la usaremos aquí para calcular la masa del mesón escalar  $\sigma$  en el vacío.

Cuando se estudian las propiedades de una partícula en un medio con el cual interacciona, el problema de definir la masa de la partícula se vuelve algo complicado. La masa, el momento magnético y otras propiedades de las partículas cambian cuando éstas se encuentran en un medio con el cual interaccionan, volviéndose inclusive difícil definir a la misma partícula en este medio. Una de las técnicas utilizadas para describir una partícula que interacciona con el medio donde se encuentra fue introducida por el físico ruso Lev Landau mediante el concepto de cuasipartícula, el cual engloba a la partícula misma y sus interacciones. Tenemos entonces que la cuasipartícula se vuelve algo difusa, con atributos que dependen de las interacciones que queramos incluir en su definición y también del modelo utilizado para definirla (Mattuck, 1992).

La existencia misma de la partícula sigma estuvo sujeta a muchas controversias, sin embargo, debido a su importancia en modelos teóricos que han sido exitosos, esta partícula ha sido objeto de intenso estudio teórico. El Modelo Sigma Lineal y el Modelo de Nambu and Jona-Lasinio son ejemplos de la importancia del sigma en el estudio de la dinámica de hadrones (Kunihiro, 1995). Tanto sus propiedades en el vacío como en la materia nuclear y su estructura misma han atraído la atención de los investigadores teóricos. Actualmente, su existencia experimental ha sido probada al ser observada en los procesos de dispersión entre dos protones  $PP \rightarrow PP$ . El anuncio de la detección de la partícula sigma fue realizado en un artículo en 2001 (Aitala *et al.*, 2001) y actualmente aparece en la publicación *Particle Data Group* (PDG) (Patrignani *et al.*, 2017) como una resonancia de dos piones con una masa de 500 MeV también llamada  $f(500)$ .

La determinación de las masas de las partículas es, por supuesto, fundamental para entender la naturaleza a escalas subatómicas. Por otra parte, para comprender los fenómenos a escala de estrellas, galaxias y cosmológicos es importante conocer las propiedades de las partículas subatómicas. Este maridaje entre lo más pequeño y lo más grande ha originado nuevos campos de la física como la astrofísica nuclear. Debido a estos fenómenos que relacionan los fenómenos a escalas cosmológicas y subatómicas, la física de partículas y la cosmología se estudian ahora en forma combinada.

## Propagadores

En este trabajo se realizan cálculos para determinar la masa física del mesón escalar sigma suponiendo que es una resonancia de dos piones y que, por tal motivo, al interactuar con el vacío cuántico, el mesón  $\sigma$  puede acoplarse a dos piones virtuales  $\pi^+\pi^-$ . Se utilizan las técnicas de la teoría cuántica relativista de campos para calcular el propagador de la partícula, y de éste se calcula la masa física del sigma. La masa así obtenida, se espera que corresponda, dentro de los límites de precisión de los experimentos, a la masa observada experimentalmente.

El concepto de propagador es fundamental en la teoría cuántica de campos y en este trabajo se emplea extensivamente. El propagador de una partícula, como su nombre lo indica, describe la propagación de ésta en el medio que estamos considerando. El propagador es una expresión matemática que describe la evolución temporal o la propagación en el tiempo y en el espacio de la partícula. En general, el propagador está dado por una expresión de variable compleja, la cual tiene una parte real y otra imaginaria. Una de las convenciones para definir la masa de una partícula es a través del propagador en el espacio de momentos  $D(k)$ , estableciendo que ésta está dada por la posición del polo del propagador  $D(k)$ . Otra forma de definir la masa de la partícula es utilizando la función espectral  $S(k)$ , la cual es definida como  $-2\pi$  veces la parte imaginaria del propagador. En este caso la masa de la partícula corresponde al valor absoluto  $|k|$  del *momentum* de la partícula, donde  $S(k)$  obtiene su máximo.

## Propagador para el campo escalar

Desde inicios del siglo XX, cuando Einstein explicó el efecto fotoeléctrico introduciendo el concepto de fotón, lo que implica un comportamiento corpuscular de la luz, la descripción dual, de onda y partícula para los campos y las partículas a la escala atómica, es la que determina correctamente su comportamiento físico. La teoría moderna que describe el comportamiento de las partículas subatómicas es la teoría cuántica de campos. En esta teoría las partículas se comportan como campos, y viceversa. En el campo electromagnético, el más estudiado y el mejor conocido de los campos, la luz es considerada en algunos experimentos como la propagación de una onda electromagnética, es decir, como un campo electromagnético que depende del tiempo y el espa-

cio, propagándose aun en el vacío. Por otra parte, en ciertos fenómenos, la luz exhibe un comportamiento de partícula, a esta partícula se le conoce como fotón. La teoría cuántica del campo electromagnético es el estudio del fotón en interacción con las partículas cargadas.

El campo más sencillo en la teoría cuántica de campos es el escalar, el cual representa partículas sin espín. El propagador asociado con este campo para una partícula libre se conoce como propagador libre, escrito como  $\Delta^0(k)$ . En el espacio de momentos su forma analítica está dada por:

$$i\Delta^0(k) = \frac{i}{k^2 - m^2 + i\epsilon} \quad (1)$$

Donde  $k$  es el momento de la partícula y  $m$  la masa desnuda de la partícula, la cual corresponde a la masa del campo cuando no hay interacciones. Como se aprecia de la ecuación (9), la masa desnuda corresponde al valor positivo de  $k$  donde  $i\Delta^0(k)$  tiene un polo (Lurié, 1968).

Al tomar en consideración las interacciones de la partícula, su propagación se ve afectada, manifestándose este efecto en un cambio en la expresión matemática del propagador. Al propagador que describe la partícula con sus interacciones se le llama *propagador modificado o vestido* (Serot y Walecka, 1986).

Esquemáticamente, los propagadores modificados a primer orden, segundo orden, etc., hasta el propagador completo,  $\Delta^1(k)$ ,  $\Delta^2(k)$ , ...,  $\Delta(k)$ , respectivamente, se representan en teoría de perturbaciones mediante diagrama de lazos y líneas.

Analíticamente el propagador completo  $\Delta(k)$ , que se expresa como una suma infinita:

$$\Delta(k) = \Delta^0 + \Delta^0 \Pi \Delta^0 + \Delta^0 \Pi \Delta^0 \Pi \Delta^0 + \dots \quad (2)$$

donde  $\Pi$  representa las interacciones de la partícula en su propagación y es llamada autoenergía de la partícula.

Esta expresión puede escribirse de la siguiente manera:

$$\Delta(k) = \Delta^0 + \Delta^0 \Pi \Delta \quad (3)$$

La ecuación (3) es conocida como la Ecuación de Dyson, de donde se obtiene que:

$$\Delta^{-1} = (\Delta^0)^{-1} - \Pi \quad (4)$$

La solución para el propagador modificado  $\Delta(k)$  está dada por:

$$\Delta = \frac{1}{(\Delta^0)^{-1} - \Pi} \quad (5)$$

$$\Delta(k) = \frac{1}{k^2 - m^2 - \Pi} \quad (6)$$

Observamos que, de acuerdo con nuestra definición de masa de la partícula (definida como el polo del propagador), ésta ha cambiado debido a la interacción, la cual hemos designado con  $\Pi$  (autoenergía).

Uno de nuestros objetivos es determinar la interacción de la partícula, la cual aparece en la función de autoenergía  $\Pi(k)$ .

## Marco teórico

La importancia de los mesones ligeros en problemas de física nuclear, materia nuclear sometida a condiciones extremas de presión y temperatura, astrofísica y cosmología, se ha puesto de manifiesto recientemente en el estudio de colisiones de núcleos pesados a energías ultrarrelativistas. La determinación de las propiedades físicas de los mesones se ha convertido en un asunto de gran importancia para la física de partículas.

La influencia de la interacción del mesón  $\sigma$  con un par de piones virtuales es introducida a través de la modificación del propagador libre en la aproximación de un solo lazo. Ésta se muestra gráficamente en la figura 1. La contribución de este diagrama de Feynman introduce la autoenergía del mesón sigma. Se calcula el propagador completo en la aproximación en cadena (Chin, 1977), la cual consiste en una suma infinita de términos de autoenergía de un solo lazo de la forma mostrada en la figura 1. La representación diagramática se muestra en la figura 2, mientras que la expresión analítica está dada por  $i\Delta(k)$  cuyo resultado aparece en la ecuación (7).

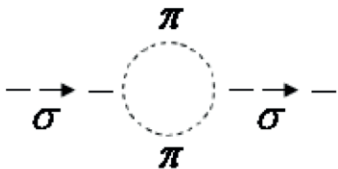


Figura 1. Diagrama para la autoenergía del mesón  $\sigma$ . La línea discontinua de rayas representa el mesón  $\sigma$  y la línea punteada representa al campo del pion.

La lagrangiana de interacción entre el mesón sigma y los dos piones está dada por

$$L_{\sigma\pi\pi} = g_{\sigma\pi\pi} m_\pi \vec{\pi} \cdot \vec{\pi} \sigma$$

donde  $\vec{\pi} = (\pi_1, \pi_2, \pi_3)$  las componentes cartesianas del campo del pion,  $\sigma$  representa el campo escalar,  $m_\pi$  la masa del pion y  $g_{\sigma\pi\pi}$  es la constante de acoplamiento entre los piones y el sigma.

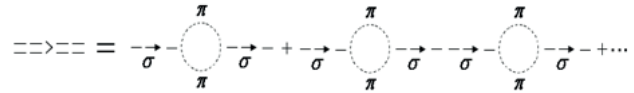


Figura 2. Propagador completo del mesón sigma en la aproximación en cadena. La línea discontinua de doble raya del lado izquierdo del símbolo de igualdad representa el propagador vestido (total) del mesón sigma. El lado derecho representa la aproximación en cadena del propagador vestido.

La solución de la ecuación de Dyson para el propagador vestido está dada por

$$\Delta(k) = \frac{1}{[\Delta_0(k)]^{-1} - \Sigma(k)} = \frac{1}{k^2 - (m_\sigma^0)^2 - \Sigma(k)} \quad (7)$$

Por otra parte, la expresión analítica para la autoenergía  $\Sigma(k)$ , está dada por (Jean, Piekarewicz y Williams, 1994; Asakawa et al., 1992):

$$-i\Sigma(k) = \frac{3}{2} g_{\sigma\pi\pi}^2 m_\pi^2 \int \left\{ \frac{d^4q}{(2\pi)^4} \frac{1}{q^2 - m_\pi^2 + i\epsilon} \cdot \frac{1}{(q-k)^2 - m_\pi^2 + i\epsilon} \right\} \quad (8)$$

Donde el coeficiente 3/2 para el lazo del pion proviene de los tres estados de isospín y del factor de la simetría por permutación (Wolf, Friman y Soyeur, 1998).

Dado que nos interesa calcular la masa del sigma en reposo, trabajaremos en su propio marco de referencia, donde  $k^\mu = (k^0, \vec{0})$ .

## RESULTADOS

Los resultados obtenidos después de realizar la integración en ecuación (8) y de renormalizar la expresión para la autoenergía a través de la expresión  $\Sigma^R(k^2) = \text{Re}\Sigma^R(k^2) + i\text{Im}\Sigma(k^2)$ , son que el propagador vestido  $D(k)$  está dado por

$$D(k) = \frac{1}{k_0^2 - m_\sigma^2 - \text{Re}\Sigma^R(k) - i\text{Im}\Sigma(k)} \quad (9)$$

y para la función espectral  $S(k)$ , partiendo de la definición dada anteriormente, como  $-2\pi$  veces la parte imaginaria del propagador, toma la forma

$$S(k) = \frac{-2\pi\text{Im}\Sigma(k)}{[k_0^2 - m_\sigma^2 - \text{Re}\Sigma^R(k)]^2 + [\text{Im}\Sigma(k)]^2} \quad (10)$$

Sustituyendo los valores obtenidos para  $\text{Im}\Sigma(k^2)$  y  $\text{Re}\Sigma^R(k^2)$  en la ecuación (10) obtenemos una expresión cerrada para la función espectral. Los parámetros que aparecen en la ecuación (10) son los valores reportados para la masa  $m_\sigma$  del mesón  $\sigma$ , el cual toma el valor de  $660 \text{ MeV}$ . Recientemente ha sido reportado el valor experimental de  $441 \text{ MeV}$  para la masa del sigma. Para ambos casos, las gráficas de  $S(k)$  obtenidas de la ecuación (10) se muestran en las partes *a)* y *b)* de la figura 3, tomando para la constante de acoplamiento entre el mesón sigma y los dos piones el valor  $g_{\sigma\pi\pi} = 12.8$  (Wolf, Friman y Soyeur, 1998).

Los resultados finales se obtienen de las gráficas de la función espectral mostradas en la figura 3. Ahí se observa, en la gráfica *a)*, que para  $m_s = 600 \text{ MeV}$  el pico de  $S(k)$  corresponde también a  $600 \text{ MeV}$ , resultado que está en concordancia con los que aparecen en las tablas para la masa del mesón sigma (Saito *et al.*, 1998). Dado que en un artículo reciente (Leutwyler, 2007) se estimó la masa del mesón Sigma en  $441 \text{ MeV}$ , se incluye también este caso en la gráfica *b)* de la figura 3. El valor de la masa para este caso es de  $400 \text{ MeV}$ .

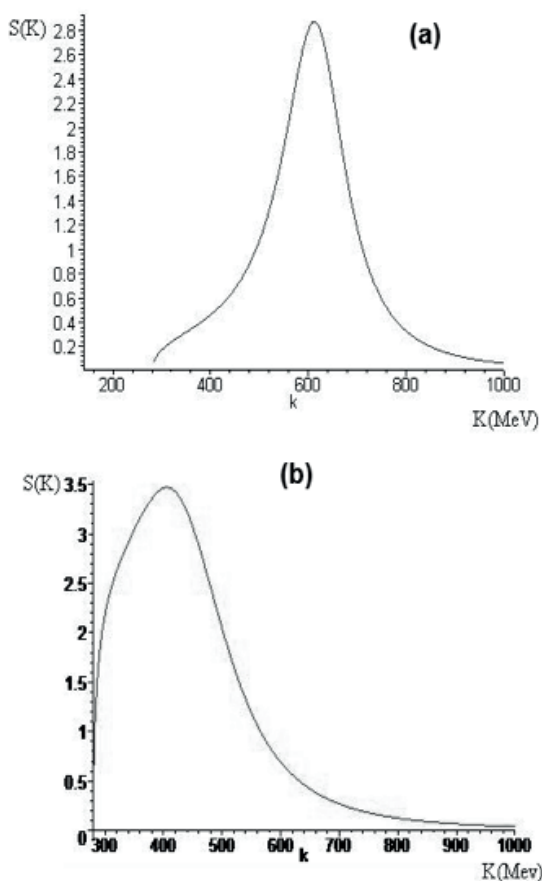


Figura 3. Funciones espectrales para el mesón sigma para los valores *(a)*  $m_s = 600 \text{ MeV}$  y *(b)*  $m_s = 441 \text{ MeV}$ .

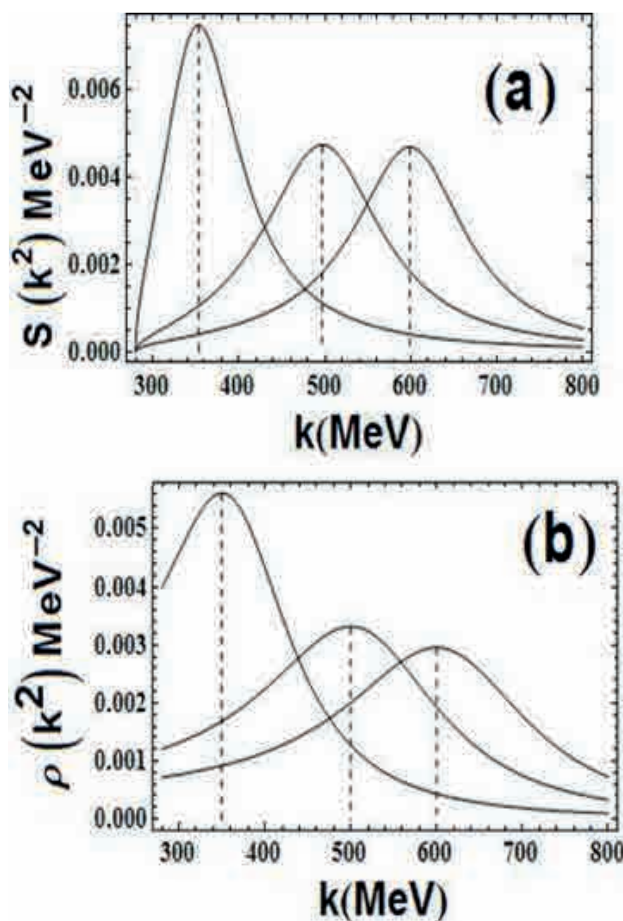


Figura 4. Soluciones gráficas para la masa y ancho del mesón sigma usando los valores reportados de  $390 \text{ MeV}$ ,  $500 \text{ MeV}$  y  $600 \text{ MeV}$  (Menchaca-Maciél y Morones-Ibarra, 2013). *(a)* Gráfica de la función espectral y *(b)* Gráfica de la densidad espectral.

## CONCLUSIONES

En el análisis teórico de la propagación del mesón  $\sigma$  en el vacío hemos calculado su masa física, obteniendo un resultado que está en perfecto acuerdo con el reportado en el (PDG) para  $f(500)$  (Kunihiro, 1995). Se observa que el valor de la masa física, determinada por el pico de la función espectral, es bastante sensible al valor de la masa inicial seleccionada, en concordancia con los resultados esperados. El uso de una sustracción simple en la relación de dispersión ha permitido regularizar la expresión para la parte real de la autoenergía  $\text{ReS}(k^2)$ , dando una expresión analítica cerrada. El principal resultado de este trabajo es que hayamos podido obtener la masa física del mesón  $s$ , bajo la consideración de que éste se acopla en el vacío a dos piones virtuales cargados. Este resultado representa una fuerte evidencia de que el mesón  $s$  puede considerarse como una resonancia de dos piones.

## REFERENCIAS

- Aitala, E.M., *et al.* (2001). Experimental Evidence for a Light and Broad Scalar Resonance in  $D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$  Decay. *Phys. Rev. Lett.* 86, 770.
- Albaladejo, M., y Oller, J.A. (2012). Size of the  $\sigma$  meson and its nature. *Phys. Rev. D* 86 034003.
- Asakawa, M., Ko, C.M., Lévai, P., *et al.* (1992). Rho meson in dense hadronic matter. *Phys. Rev. C* 46 R1159.
- Ayala, A., Bashir, A., Raya, A., *et al.* (2009). Chiral phase transition in relativistic heavy-ion collisions with weak magnetic fields: Ring diagrams in the linear sigma model. *Phys. Rev. D* 80.
- Bowmana, P.O., Hellerb, U.M., Leinwebera, D.B., *et al.* (2004). Infrared and ultraviolet properties of the Landau gauge quark propagator. *Nuclear Physics. B (Proc. Suppl.)*. 128: 23-29.
- CERN. (s.a). *Heavy ions and quark-gluon plasma*. Disponible en <http://home.web.cern.ch/about/physics/heavy-ions-and-quark-gluon-plasma>
- Chin, S.A. (1977). A relativistic many-body theory of high density matter. *Ann. Phys.* 108(2): 301-367.
- Close, F.E., y Tornqvist, N.A. (2002). Scalar mesons above and below 1 GeV. *J. Phys. G* 28 R249.
- Dutt-Mazumder, A.K., Kundu, B.D.R.A., y De, T. (1996). Tensor coupling and vector mesons in dense nuclear matter. *Phys. Rev. C* 53 790.
- Fodor, Z. (2012). Selected results in lattice quantum chromodynamics PTEP2012 01A108. *Prog. Theor. Exp. Phys.*
- Hermann, M., Friman, B., y Nörenberg, W. (1993). Properties of  $\rho$ -mesons in nuclear matter. *Nucl. Phys. A* 560 411.
- Jacak, B.V., y Muller, B. (2012). The exploration of hot nuclear matter. *Science*. 337- 310.
- Jean, H.C., Piekarewicz, J., y Williams, A.G. (1994). Medium modifications to the  $\omega$ -meson mass in the Walecka model. *Phys. Rev. C* 34.
- Kenkyu, S. (kyoto). (2001). Possible existence of the sigma-meson and its implications to hadron Physics. *KEK Proceedings 2000-4*. 102 E1. The proceedings of this workshop.
- Kim, Y., Rapp, R., Brown, G.E., *et al.* (1999). A schematic model for density dependent vector meson masses. RHIC Physics and Beyond. 17 (American Institute of Physics, CP482).
- Kunihiro, T. (1995). A Geometrical Formulation of the Renormalization Group Method for Global Analysis. *Progress of Theoretical Physics*. 94(4): 503-514.
- Leutwyler, H. (2007). Mass and Width of the  $\sigma$ . *Int. J. Mod. Phys. A* 22(2-3): 257-265.
- Lurié, D. (1968). *Particles and Fields*. EE.UU.: Interscience Publishers, p 266.
- Mattuck, R.D. (1992). *A Guide to Feynman Diagrams in the Many Body Problem*. EE.UU. Dover Publications Inc.
- Menchaca-Maciel, M.C., y Morones-Ibarra, J.R. (2013). Sigma meson in vacuum and nuclear matter. *J.R., Indian J. Phys.* 87(4): 385-390.
- Morita, K., Muroya, S., Nakamura, H., *et al.* (2000). Numerical analysis of a two-pion correlation function based on a hydrodynamical model. *Phys. Rev. C* 61, 034904.
- Parganlija, D., y Giacosa, F. (2017). The  $f_0$  (1790) and  $\alpha_0$  (1950) Resonances as Excited  $qq$  States in the Extended Linear Sigma Model. *Eur. Phys. J. C*. 77(7): 450.
- Pasechnik, R., y Sumbera, M. (2017). Phenomenological Review on Quark-Gluon Plasma: Concepts vs. Observations. *Universe*. 3(1): 7.
- Patrignani, C., Agashe, K., Aielli, G., *et al.* (2017). Review of particle physics. *Chinese Physics C* 40(10).
- Saito, K., Tsushima, K., Thomas, A., *et al.* (1998).  $\sigma$  and  $\omega$  meson propagation in a dense nuclear medium. *Phys. Lett. B*. 433(3-4): 243-249.
- Serot, B.D., y Walecka, J.D. (1986). The Relativistic Nuclear Many Body Problem. *Adv. Nucl. Phys.* 16:1-327.
- Shiomi, H., y Hatsuda, T., (1994). Vector mesons in nuclear medium-an effective lagrangian approach. *Phys. Lett. B*. 334 281.
- Wolf, G., Friman, B., y Soyeur, M. (1998b). In-medium  $\omega$ -meson broadening and s-wave pion annihilation into  $e^+ e^-$  pairs. *Nucl. Phys. A*. 640(1): 129-143.

RECIBIDO: 28/01/2018  
ACEPTADO: 23/04/2018



# Recubrimientos nanoestructurados $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ en aleaciones de aluminio 6061-T6

Manuel Gutiérrez\*, Luis Arturo Reyes\*, Bárbara Bermúdez-Reyes\*,  
Lizángela Guerra-Fuentes\*, Patricia C. Zambrano Robledo\*

DOI: /10.29105/cienciauanl22.96-3

## RESUMEN

Este artículo reporta el desarrollo y caracterización de recubrimientos nanoestructurados  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  mediante la técnica de sol-gel en sustratos de aluminio 6061-T6. Se realizaron pruebas de nanoindentación y se obtuvo una dureza de 2.12 Ga y un módulo de Young de 81.17 GPa. Los resultados del estudio superficial muestran un espesor de 1.12  $\mu\text{m}$  y una rugosidad promedio de 2.198  $\mu\text{m}$ , las pruebas de resistencia a la corrosión mediante resistencia a la polarización (Rp) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE) mostraron una resistencia de  $5.53 \times 10^{-3}$  mm/año y 17,270 ( $\Omega \text{ cm}^2$ ), respectivamente. Los efectos de las pruebas electroquímicas son reportados mediante microscopia electrónica de barrido. Esta investigación genera conocimiento acerca del desempeño de metales recubiertos con materiales cerámicos nanoestructurados.

Palabras clave: nanopartículas, aluminio 6061-T6, Sol-Gel,  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ .

Las aleaciones de aluminio muestran una excelente resistencia a la corrosión en diversos ambientes atmosféricos, incluyendo agua salada y petroquímica. La aleación 6061-T6 posee una excelente resistencia a la corrosión en condiciones atmosféricas estándar, cuenta con una buena resistencia a la corrosión en agua de mar, y es utilizada en carcasas de naves espaciales, siendo éstas formadas y soldadas; asimismo, esta aleación se emplea en aplicaciones ferroviarias y estructurales debido a su excelente resistencia a la corrosión y su buena soldabilidad. Uno de los principales sistemas que mejoran la protección contra la corrosión son los recubrimientos de  $\text{SiO}_2$  y  $\text{TiO}_2$  (Shanaghi, 2009), desarrollados mediante el proceso sol-gel, estos recubrimientos proporcionan mejoras en propiedades químicas y mecánicas. Capas delgadas de  $\text{TiO}_2$  son empleadas en una gran variedad de aplicaciones, como filtros ultravioletas para materiales ópticos y de embalaje, recubrimientos antirreflectantes para celdas fotovoltaicas, colectores solares pasivos, entre otras.

## ABSTRACT

*This article reports the development and characterization of nano-structures of  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  coatings by the sol-gel technique on 6061-T6 aluminum substrates. Nanoindentation tests report a value of 2.128 GPa and a Young's modulus of 81.171 GPa for the coated samples. In addition, a thickness of 1.12  $\mu\text{m}$  and an average roughness of 2.198  $\mu\text{m}$  were obtained by surface analysis. Corrosion resistance was analyzed by polarization resistance (PR) and electrochemical impedance spectroscopy (EIS) showing a resistance of  $5.53 \times 10^{-3}$  mm / year and 17,270 ( $\Omega \text{ cm}^2$ ) respectively. Finally, effects of electrochemical test were evaluated by scanning electron microscopy (SEM). This research generates knowledge of the performance of metals coated with ceramic materials.*

Keywords: nanoparticles, coatings, aluminum 6061-T6, sol-gel,  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ .

Diferentes técnicas han sido utilizadas en la preparación de recubrimientos delgados de  $\text{TiO}_2$  (Shanaghi, 2008): deposición de arco catódico, deposición de láser y el proceso sol-gel. La técnica sol-gel posee ventajas sobre otros procesos en virtud de su excelente control sobre la composición y su homogeneidad debido a la mezcla en líquido precursor y bajas temperaturas de cristalización. Diversas investigaciones describen las propiedades de los recubrimientos  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ ; Soklic (2015) utilizó recubrimientos con nanopartículas  $\text{TiO}_2$  en aplicaciones ambientales, éstas han mostrado un buen efecto antiempañamiento, superficie autolimpiante y antimicrobiana debido a sus propiedades fotocatalíticas y superhidrofilicidad fotoinducida. Çomakli (2017) desarrolló películas compuestas de  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  mediante sol-gel para investigar el comportamiento del tiempo de envejecimiento solar y sus posibles efectos en revestimientos compuestos de propiedades estructurales y electroquímicas.

\* Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Contacto: luis.reyessr@uanl.edu.mx



En pruebas de corrosión como EIE, RP y curvas de Tafel, los recubrimientos compuestos muestran un mejor rendimiento que aquellos sin recubrimiento. Asimismo, las propiedades de corrosión de las películas compuestas se vieron considerablemente afectadas por el tiempo de envejecimiento de tres a diez semanas. Gobara (2015) utilizó nanopartículas de  $\text{TiO}_2$  y  $\text{SiO}_2$  que se introdujeron en gel de sílice híbrido, sol-gel/epoxi, para mejorar las propiedades mecánicas de los recubrimientos, este recubrimiento se aplicó superficialmente en la aleación Al 3003, los resultados de corte transversal mostraron una mejora significativa del rendimiento de adhesión del recubrimiento híbrido sol-gel de sílice debido a la adición de  $\text{TiO}_2$  y las mediciones de ángulo de contacto por el método de caída colgante demostraron superioridad en hidrofobicidad del revestimiento de sol-gel por la adición de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ . Por otro lado, los recientes avances en técnicas de pruebas mecánicas a microescala, incluida la nanoindentación, han permitido determinar propiedades como módulo de Young y dureza de este tipo de recubrimientos submicrométricos (Pharr, 2004); con estas técnicas es posible medir el comportamiento mecánico en diversos recubrimientos. El objetivo de esta investigación es mejorar las propiedades mecánicas y químicas de la aleación Al 6061-T6 mediante el desarrollo de recubrimientos nanoestructurados  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$ .

## EXPERIMENTACIÓN

### Preparación de las muestras

Las muestras de Al 6061-T6 fueron maquinadas y seccionadas a tamaños de 25mmx25mm y 7mm de espesor; posteriormente fueron pulidas hasta obtener un adecuado acabado final. Se utilizó espectroscopia de energía dispersa para obtener la composición de los principales elementos de la aleación de aluminio 6061-T6, Al 85.45%, Mg 3.1%, Zn 6.15%, Cu 5.25%. El sustrato fue caracterizado mediante microscopia óptica a través de un microscopio óptico ZEISS observer Z1 y microscopia electrónica de barrido, JEOL JSM-6510LV, en la caracterización morfológica de los recubrimientos.

### Recubrimiento

Las muestras fueron preparadas utilizando el proceso sol-gel. Tetraetoxisilano (TEOS) de sigma Aldrich y etanol (EtOH) de Baker se usaron en una relación de 1:1, posteriormente, agua desionizada y ácido nítrico fueron añadidos como catalizador con 3% en peso de nanopartículas de  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  previamente funcionalizadas. La mezcla se agitó hasta completar la hidrólisis. El recubrimiento fue depositado en sustratos de aluminio 6061-

T6 por la técnica de inmersión-remoción a una velocidad de remoción de 0.125mm/s. Después de la deposición, las muestras recubiertas fueron secadas a 180°C por diez minutos para eliminar solventes, realizando un tratamiento térmico a 300°C por dos horas para densificación y eliminación de poros en el recubrimiento.

### Análisis superficial

El análisis superficial se llevó a cabo obteniendo un valor promedio de rugosidad (Ra) medido en micrómetros entre los puntos analizados. Los recubrimientos  $\text{SiO}_2$ - $\text{TiO}_2$  fueron medidos en las muestras de aluminio, las mediciones se obtuvieron con base en la técnica de escalón para medir el espesor del recubrimiento y obtener un valor promedio. Las medidas de rugosidad y espesor de los recubrimientos se realizaron con un perfilómetro Brucker Contour Gt, el cual permite medir el grosor de cada punto en el campo de visión destacando las variaciones de grosor y uniformidad en un área de hasta 50 mm<sup>2</sup>.

### Nanoindentación

Se realizaron pruebas de nanoindentación en un nanoindentador CSM instruments, con una punta de diamante tipo Berkovich a una resolución de 0.04  $\mu\text{m}$ , los parámetros utilizados fueron: carga aplicada 5 mN, velocidad de nanoindentación 10 mN/min y tiempo de estancia dos segundos. Los parámetros fueron seleccionados considerando que las indentaciones no excedieran más de 20% del espesor del recubrimiento, evitando así la interferencia con el sustrato.

### Pruebas de corrosión

Se realizaron pruebas para evaluar la resistencia a la corrosión: resistencia a la polarización (Rp) y espectroscopia de impedancia electroquímica (EIE). Los parámetros para la prueba de resistencia a la polarización se obtuvieron a una velocidad de 0.1 mV/s y un barrido de potencial de -0.015 a 0.015 V. Las medidas de espectroscopia de impedancia electroquímica fueron realizadas en un equipo Solartron SI 1260 (Impedance/Gain-Phase analyzer), se utilizó una celda electrolítica con una solución de 3.5% en peso de NaCl después de 20 horas de inmersión. Las pruebas de EIE fueron realizadas bajo un sistema de tres electrodos; el aluminio 6061-T6 fue empleado como electrodo de trabajo, un electrodo de Calomel fue utilizado como electrodo de referencia y una malla de platino fue utilizada como electrodo auxiliar. El área de contacto fue de 1 cm<sup>2</sup>. Las mediciones fueron realizadas en un rango de frecuencia de 50 kHz to 0.01 Hz (diez puntos década de frecuencia). La amplitud del voltaje de perturbación fue de 10 mV.

## RESULTADOS

### Caracterización microestructural

La caracterización de la muestra de aluminio 6061-T6 presentó una microestructura dendrítica equiaxial, se observaron regiones con predominio de precipitados, principalmente en los límites de grano y en el contorno de los brazos dendríticos, los precipitados identificados con morfología de bastón suelen ser denominados precipitados metaestables semicoherentes (Ortiz, 2000). Ambos tipos de precipitados tienden a incrementar en tamaño después del tratamiento térmico T6, por lo que se localizan en toda la región de análisis de la muestra (Valadez, 2010).

### EDS y mapeo químico del recubrimiento

La figura 1a presenta una micrografía del recubrimiento donde se puede observar que éste es uniforme y homogéneo y con cierto grado de transparencia. La figura 1b muestra el análisis EDS del recubrimiento, éste se filtró de tal manera que sólo se observaran los componentes principales del recubrimiento y el sustrato. Se pueden observar altos contenidos de silicio y oxígeno debido a la base del recubrimiento de  $\text{SiO}_2$ . Además, una pequeña cantidad de Ti puede ser observado debido a las nanopartículas  $\text{TiO}_2$  contenidas en la matriz sol-gel de  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ .

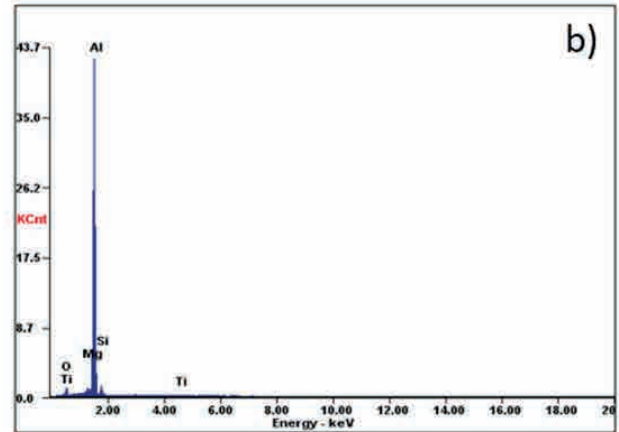
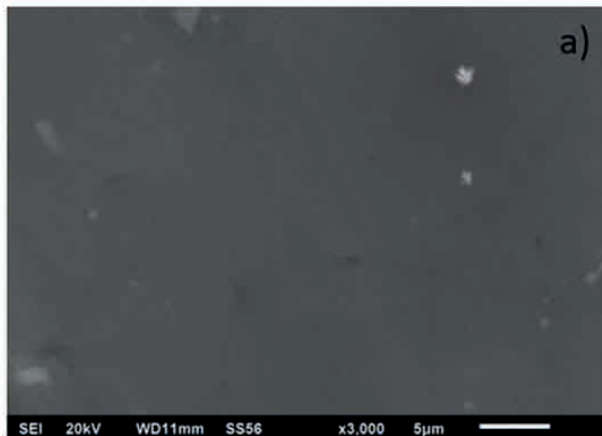


Figura 1. a) MEB micrografía de muestra recubierta a 3000X; b) análisis EDS del recubrimiento.

El mapeo químico de los principales elementos del recubrimiento es observado en la figura 2a, la cual muestra la distribución de silicio en el área seleccionada, mientras que la figura 2b muestra la distribución de titanio. Se puede apreciar en ambas imágenes una distribución uniforme de los elementos del recubrimiento, una distribución más densa de silicio y una concentración menor de titanio. El mapeo químico demostró que el recubrimiento fue aplicado con éxito y se encuentra uniformemente distribuido en el sustrato.

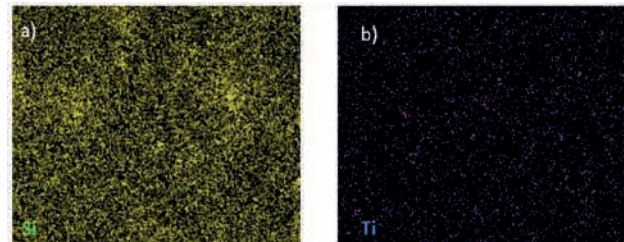


Figura 2. Mapeo químico de la distribución de los elementos del recubrimiento.

### Rugosidad y espesor del recubrimiento

El estudio superficial de las muestras recubiertas mostró una baja rugosidad y un espesor delgado, la rugosidad obtenida fue de  $2.198 \mu\text{m}$ . Trabajos previos (Krzak-Roś, 2009) reportan valores de rugosidad de  $630 \text{ nm}$  a  $2.5 \mu\text{m}$  para recubrimientos  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ . El espesor promedio para las muestras recubiertas fue de  $1.12 \mu\text{m}$ , trabajos previos reportan valores de  $0.5 \mu\text{m}$  a  $3 \mu\text{m}$  para recubrimientos similares, siendo congruentes con investigaciones reportadas (Pharr, 1992; Ortiz, 2000).

## Dureza y módulo de Young

El aluminio 6061-T6 tiene un módulo de Young estándar de 69 GPa, y una dureza de 0.124 GPa (Lin, 2010; Lefebvre, 2002). Las pruebas de nanoindentación registraron un módulo de Young promedio de 81.171 GPa, y una dureza promedio de 2.128 GPa para los recubrimientos. Acorde con Ohiring (2002), estos recubrimientos pueden incrementar 60-120%. El recubrimiento incrementó su módulo de Young en 17.60%. Se puede apreciar finalmente una dureza y módulo de Young mayor por parte de las muestras recubiertas.

## Rp y EIE

En las pruebas de Rp se observó que el promedio de la velocidad de corrosión del aluminio recubierto es de  $5.53 \times 10^{-3}$  mm/año, mientras que la velocidad de corrosión del aluminio sin recubrimiento fue de  $7.92 \times 10^{-2}$  mm/año, lo que muestra que existe una menor velocidad de corrosión en el aluminio recubierto contra el aluminio desnudo, esto se refleja en el promedio de la resistencia a la corrosión en el aluminio recubierto de  $5.13 \times 10^5$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ), mientras que en el aluminio sin recubrimiento la resistencia fue de  $3.59 \times 10^3$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ), mostrando una resistencia superior a la corrosión del aluminio recubierto contra el aluminio desnudo.

Las figuras 3 y 4 presentan el comportamiento a corrosión, resultados obtenidos de las pruebas de EIE. Los diagramas de Nyquist y de Bode fueron desarrollados para determinar la velocidad a la corrosión de ambas muestras. En el de Nyquist, la línea roja representa el comportamiento del recubrimiento y la línea negra el comportamiento del aluminio sin recubrimiento, el recuadro agregado indica el comportamiento a altas frecuencias; se observa un valor de  $1257.8$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ) para muestras sin recubrimiento y de  $2200$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ) para muestras con recubrimiento, el valor de impedancia a baja frecuencia fue de  $15702$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ). La velocidad de corrosión es determinada por el diámetro de los semicírculos, los cuales están relacionados con la resistencia a la corrosión, diámetros grandes indican una baja velocidad de corrosión, los gráficos de Bode y ángulo de fase con respecto a la frecuencia se observan en la figura 4. La gráfica de fase en baja y mediana frecuencia muestran los procesos de transferencia de carga entre el recubrimiento y la solución. Altos valores en estas regiones son asociados principalmente con porosidad o procesos de difusión.

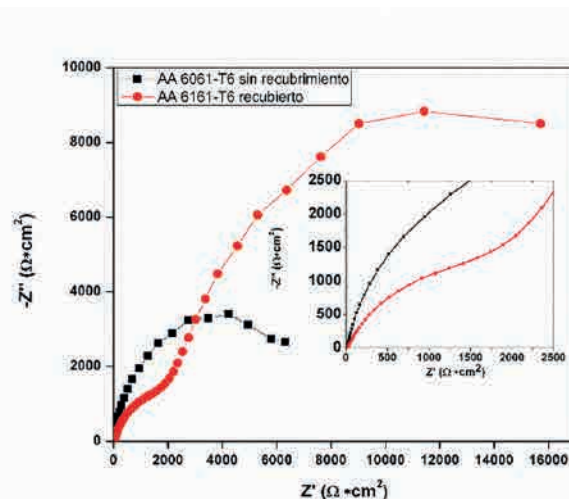
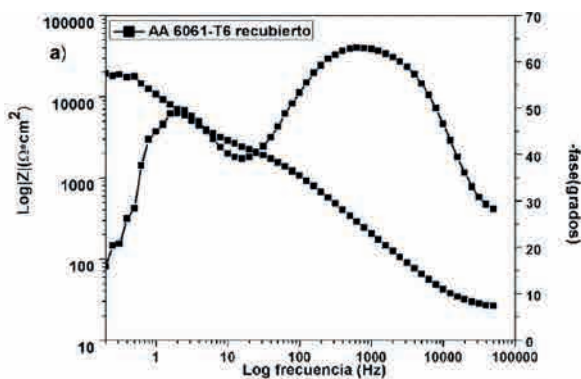


Figura 3. Diagrama de Nyquist para aluminio recubierto y aluminio sin recubrimiento.

El diagrama de Nyquist muestra el comportamiento del recubrimiento a diferentes frecuencias, donde un alto valor de  $Z$  a baja frecuencia indica una mejor resistencia a la corrosión (Uruchurtu-Chavarin, 2016). Una sola constante de tiempo puede ser observada, lo que muestra comportamiento capacitivo a baja frecuencia en la muestra sin recubrimiento. Por otra parte, en la muestra recubierta se observan dos constantes de tiempo, lo cual indica un comportamiento capacitivo a alta frecuencia. La constante de alta frecuencia representa la resistencia a la corrosión ejercida por el recubrimiento  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ , después, el comportamiento comienza a ser inductivo, subiendo y proporcionando una segunda constante a baja frecuencia, lo que representa la resistencia de transferencia de carga ejercida por la interacción entre el sustrato y la solución NaCl, implicando una alta resistencia a la corrosión debido a los elementos presentes en la aleación de aluminio.



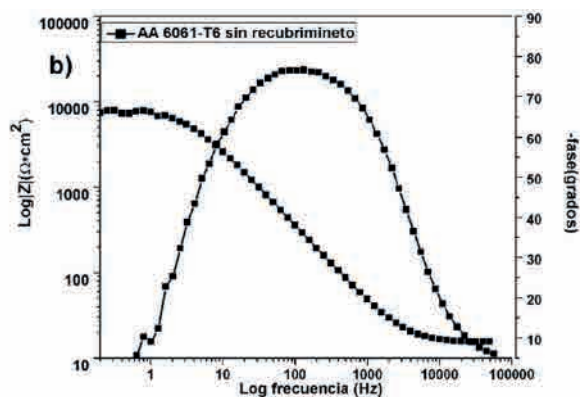


Figura 4. Diagrama de Bode y fase, a) aluminio recubierto, b) aluminio sin recubrimiento.

En el diagrama de Bode de la figura 4 se observa que la impedancia es mayor en el material recubierto, comparado con la muestra sin recubrimiento, reflejando superior resistencia a la corrosión; además se observa (figura 4b) que posee una constante de tiempo y que el aluminio recubierto presenta dos constantes de tiempo (figura 4a). La constante de tiempo en la región de alta frecuencia es atribuida a la protección  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ , la constante de tiempo a baja frecuencia se debe al proceso de corrosión en la interface  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ /aluminio (Curkovic, 2013). En el aluminio recubierto puede observarse que la constante de tiempo a baja frecuencia es más pequeña y que en la zona capacitiva el ángulo de fase tiende a cero, lo que indica que la resistencia de la barrera está siendo alcanzada. La constante de tiempo a alta frecuencia se presenta a un ángulo de fase de  $-65$ , sin embargo, la constante de tiempo a baja frecuencia alcanza un valor de ángulo de  $-45$ , lo cual es probable que sea inducido por algunas imperfecciones en el recubrimiento debido a fracturas o picaduras, mismas que fueron apreciadas en el MEB. En las pruebas de EIE fueron utilizados circuitos equivalentes. De los circuitos equivalentes se obtuvieron las siguientes resistencias: una resistencia de  $7,126.32 (\Omega \text{ cm}^2)$  para el material sin recubrimiento, y para el material con recubrimiento se obtuvo un valor de  $17,270 (\Omega \text{ cm}^2)$ , mostrando una clara superioridad en el aluminio recubierto. Trabajos previos (Gutiérrez, 2018) indican que este tipo de recubrimientos mejoran la resistencia a la corrosión del sustrato con valores de  $2.8 \times 10^5$  a  $5.85 \times 10^5 (\Omega \text{ cm}^2)$ . De manera similar, Huang (2016) reportó recubrimientos en aluminio 6061-T6 a diferentes temperaturas de operación, mostrando una resistencia de entre  $10000 (\Omega \text{ cm}^2)$  a  $35000 (\Omega \text{ cm}^2)$ .

## Análisis MEB

La figura 5 muestra los resultados del ataque realizado al aluminio recubierto. En la figura 5a se pueden observar bajas concentraciones de sodio y altos contenidos de óxido de silicio en forma

de cristales fracturados (círculo), ubicados principalmente en los límites de la muestra, estos cristales representan el recubrimiento, y presentan deterioro a causa del ataque corrosivo. La figura 5b presenta uno de los pocos puntos de corrosión localizada, en el que existe presencia de compuestos como NaCl, azufre y alúmina (recuadrado rojo).

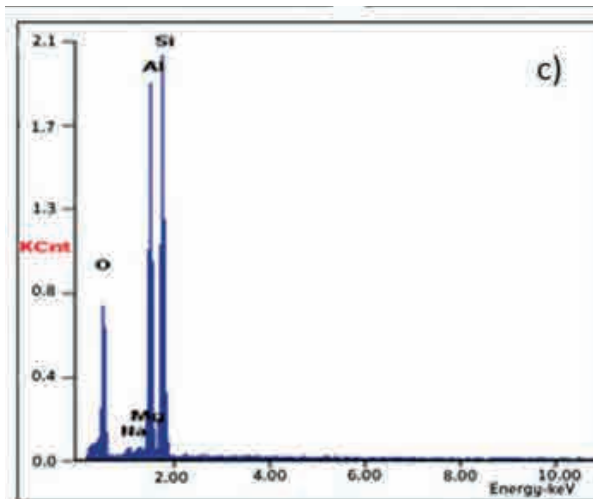
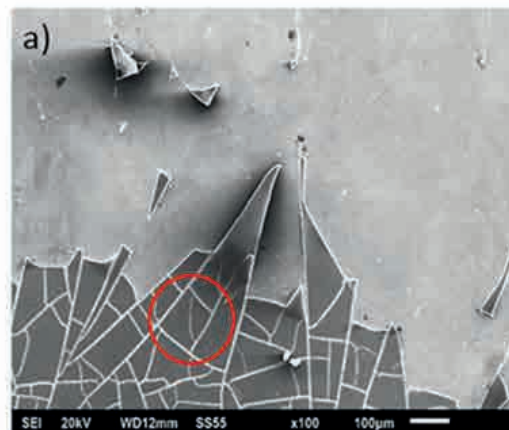


Figura 5. Micrografía de aluminio recubierto y atacado, a) 100x b) 500x, c) análisis EDS.

## CONCLUSIÓN

Se observaron recubrimientos homogéneos, poco rugosos y sin presencia de fracturas; el mapeo químico confirmó la presencia del recubrimiento sobre los sustratos, revelando la presencia de nanopartículas de  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ . Las pruebas de nanoindentación realizadas indican que el recubrimiento  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  presentó un módulo de Young promedio de 81.171 GPa y una dureza de 2.128 GPa. En contraste, el aluminio sin recubrimiento tuvo un módulo de Young de 69 GPa y una dureza con un valor de 0.124 GPa, lo que indica una clara superioridad y un incremento de 17% en el módulo de Young. Se estableció que los recubrimientos presentaron una buena resistencia a la corrosión, las pruebas de Rp y EIE mostraron que los recubrimientos  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$  poseen una resistencia a la corrosión de  $5.13 \times 10^5$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ), mientras que el aluminio sin recubrimiento logró una resistencia de  $3.59 \times 10^3$  ( $\Omega \text{ cm}^2$ ), presentando una resistencia cinco veces mayor y una disminución de la velocidad de corrosión de  $7.92 \times 10^{-2}$  a  $5.53 \times 10^{-3}$  mm/año, consiguiendo una reducción de la velocidad hasta de cinco veces con el recubrimiento. Las muestras recubiertas fueron observadas después de estar sometidas a 20 horas en inmersión en NaCl y presentaron algunas imperfecciones, principalmente picaduras y fracturas localizadas.

## REFERENCIAS

- Çomaklı, O. (2017). The Effects of aging time on the structural and electrochemical properties of composite coatings on CP-Ti substrate. *Journal of Bionic Engineering*, 14: 532-539.
- Curkovic, L. (2013). Enhancement of corrosion protection of AISI 304 stainless steel by anodized sol-gel TiO<sub>2</sub> films. *Corrosion Science*, 77:176-184.
- Gobara, M. (2015). Effects of TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> reinforced nanoparticles on the mechanical properties of green hybrid coating. *International Letters of chemistry, Physics and Astronomy*, 47:56-66.
- Gutiérrez, M. (2018). Characterization of SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> Coatings on 316L Stainless Steel Substrates. *Journal of Advanced Materials and Processing*, 6(1): 3-13.
- Huang, I.W. Hurley, B.L., Buchheit, R.G., et al. Dependence on Temperature, pH, and Cl in the Uniform Corrosion of Aluminum Alloys 2024-T3, 6061-T6, and 7075-T6. *Electrochimica Acta*, 199: 242-253.
- Krzak-Roś, J., Filipiak, J., Pezowicz, C., et al. (2009). The effect of substrate roughness on the surface structure of TiO<sub>2</sub>, SiO<sub>2</sub>, and doped thin films prepared by sol-gel method. *Acta Bioeng. Biomech.* 11: 21-29.
- Lefebvre, D. (2002). The effect of surface treatment on interfacial fatigue crack initiation in aluminum/epoxy bonds. *International Journal of Fracture*, 114:191-202.
- Lin, G. (2010). effects of whisker surface treatment on microstructure and properties of Al18B4033w/6061 Al composites. *Transactions of nonferrous metals society of china*, 20: 349-354.
- Ohiring, M. (2002). Materials Science of thin films deposition and structure. *Academic Press*, 114: 718-720.
- Ortiz, J.L., Amigó, V., Salvador, D., et al. (2000). Microestructura y propiedades mecánicas de materiales compuestos de matriz Al-Mg-Si-Cu reforzada con AlNp, procesados por extrusión de polvos. *Revista de Metalurgia*, 36: 348-356.
- Pharr, G. M., Oliver, W.C. (1992). Measurement of thin film mechanical properties using Nanoindentation. *MRS Bull.* 17: 28-33.
- Pharr, G.M, Oliver, W.C. (2004). Measurement of hardness and elastic modulus by instrumented indentation: Advances in understanding and refinements to methodology. *Journal of Material research*, 19: 3-20.
- Shanaghi, A., Rouhaghdam, A., Shahrabi, T., et al. (2008). Study of TiO<sub>2</sub> nanoparticle coatings by sol-gel method for corrosion protection. *Mater. Sci* 44(233-247): 305-311.
- Shanaghi, A., Sabour, A.R, Shahrabi, T., et al. (2009). Corrosion protection of mild steel by applying TiO<sub>2</sub> nanoparticle coating via sol-gel method. *Prot. Met. Phys. Chem. surface*, 45: 305-311.
- Soklic, A. (2015). Deposition and possible influence of a self-cleaning thin TiO<sub>2</sub>/SiO<sub>2</sub> film on photovoltaic module efficiency. *Catalysis Today*, 252: 54-60.
- Uruchurtu-Chavarin, J., J.R. (2016). *Experimental methods in the science of corrosion electrochemical impedance*. EAE Editorial Academia Española.
- Valadez, S., Zanatta, A., Robles, S., et al. (2010). Microstructural Analysis of Al-Mg-Si-Zn alloy. *DYNA*, 163: 9-12.

RECIBIDO: 23/10/2018  
ACEPTADO: 07/03/2019



# Sobre el análisis de la forma de los datos: un nuevo paradigma en ciencia de datos

Jesús Francisco Espinoza Fierro\*, Yitzhak David Gutiérrez Moya\*, Rosalía Guadalupe Hernández Amador\*

DOI: / 10.29105/cienciauanl22.96-4

## RESUMEN

La ciencia de datos es un área multidisciplinaria en la que convergen herramientas de estadística, cómputo científico, matemáticas puras y un profundo entendimiento del contexto del problema a estudiar. Dentro de esta área han surgido recientes investigaciones en las que el análisis se enfoca en un aspecto más cualitativo del estudio, a saber: *la forma de los datos*. En el presente trabajo describimos esquemáticamente algunas de las herramientas para implementar dicho análisis y presentamos como propuesta un algoritmo eficiente, auxiliar en el estudio de estructuras de baja dimensión simplicial, inmersas en un espacio de representabilidad de dimensión alta.

Palabras clave: análisis topológico de datos, complejo de Vietoris-Rips, complejo de Cech, bola minimal.

## ABSTRACT

*Data science is a multidisciplinary area in which statistics, scientific computation, pure mathematics and a deep understanding of the context of the problem to be studied converge. Within this area, recent studies have emerged in which the analysis centers on a qualitative aspect of the study, the form of the data. In the present research some of the tools to schematically implement this analysis are described, and an efficient algorithm to the study of low dimensional structures, immersed in a high dimension representability space is proposed.*

Keywords: topological data analysis, Vietoris-Rips complex, Cech complex, miniball problem.

Dentro de las matemáticas, diversas áreas han sido tradicionalmente consideradas como puras (o básicas), entre las que se destaca la topología, por considerarse una de las “geometrías más elementales”, encargada de estudiar la forma de ciertos objetos, así como las propiedades que se preservan al deformarlos continuamente, es decir, sin rompimientos ni pegaduras. Las recientes aplicaciones que ésta ha tenido junto con el álgebra, así como la impresionante integración con áreas como la combinatoria, la probabilidad, la estadística y el cómputo científico, han propiciado la consolidación de una interesante área llamada análisis topológico de datos (ATD); puede consultarse Zomorodian (2012) para una introducción al tema, y Otter *et al.* (2017) para una exposición panorámica, alcances del ATD y su implementación computacional.

Debido al amplio espectro de tópicos en donde se ha implementado (Piangerelli *et al.*, 2018; Pranav *et al.*, 2017; Taylor *et al.*, 2015; Nicolau, Levine y Carlsson, 2011), el ATD ha revolucionado viejos paradigmas, posicionándose como una herramienta sólida y estable para abordar el análisis de complejas estructuras de nubes de datos y consolidándose como un importante

recurso para el entendimiento de estructuras geométricas de dimensiones superiores.

Esquemáticamente, el ATD consiste en el uso de las técnicas de la topología y el álgebra para el análisis de nubes de puntos (datos) en donde existe una noción de cercanía, dotando primero a éstos con una familia de estructuras geométricas (filtración simplicial). Luego, mediante distintas herramientas del álgebra lineal, se realiza el cálculo de lo que en topología algebraica es conocido como homología persistente (definida en 2002 por Edelsbrunner, Letscher y Zomorodian) y que consiste de una familia de espacios vectoriales apropiadamente construidos; tal estructura algebraica es representada gráficamente en un código de barras o en un diagrama de persistencia (Carlsson *et al.*, 2004). Dependiendo de la manera en la que se construye la estructura simplicial filtrada, se tiene una correspondiente interpretación de lo que el código de barras está detectando.

\* Universidad de Sonora.

Contacto: [jesus.espinoza@mat.uson.mx](mailto:jesus.espinoza@mat.uson.mx)

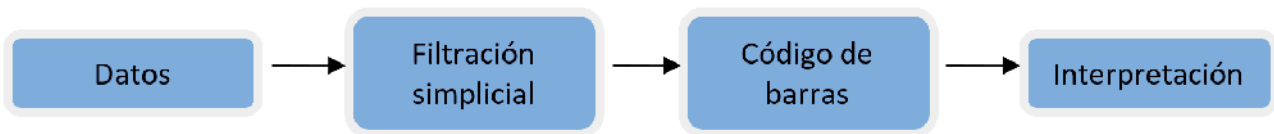


Figura 1. Esquema de trabajo del análisis topológico de datos (ATD).

Cada uno de los pasos del ATD señalado en la figura 1 representa un área de investigación actualmente activa, y entrar en mayores detalles escapa de los objetivos del presente escrito, por lo que nos enfocaremos en la primera parte del ATD: la construcción de una estructura simplicial filtrada asociada a una nube de puntos (los datos). Identificar la estructura adecuada con la cual dotar de geometría a los datos es uno de los aspectos clave y no triviales para realizar el análisis.

## LA FORMA DE LOS DATOS

El ATD se realiza bajo la hipótesis de que los datos encajan en cierto modelo salvo ruido, esto es, que existe una estructura geométrica y el correspondiente sistema de ecuaciones que la modela, de donde los datos han sido muestreados salvo cierto ruido, y es tarea del ATD inferir dicho espacio mediante la detección de ciertas características relativas a su forma. Por ejemplo, en la figura 2 se muestran tres nubes de puntos representadas en el plano. Intuitivamente podemos inferir la geometría del modelo subyacente en cada caso: en la nube de puntos de la izquierda, la experiencia dicta utilizar un modelo de regresión lineal; para las otras dos nubes de puntos, es claro que el espacio subyacente no tiene una estructura lineal, más bien del tipo periódico para la gráfica del centro y de agrupamiento para la gráfica de la derecha.

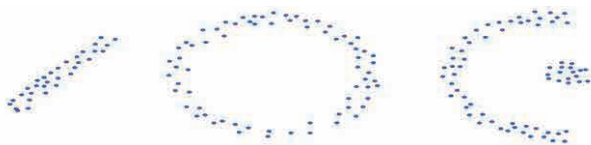


Figura 2. Nubes de puntos en el plano.

## DISTINTAS GEOMETRÍAS SOBRE UNA NUBE DE PUNTOS

### El complejo simplicial de Vietoris-Rips

Dada una nube de puntos  $N = \{x_1, \dots, x_n\}$  en un espacio métrico y un parámetro de proximidad  $\varepsilon \geq 0$ , una manera usual de asociar una estructura geométrica (o combinatoria) a  $N$ , es

construir la gráfica cuyo conjunto de vértices  $N_0$  consta de todos los subconjuntos unitarios  $\{x_i\}$  de  $N$ , y el conjunto de aristas  $N_1$  consiste de los subconjuntos de  $N$  con dos elementos  $\{x_i, x_j\} \subset N$  que satisfacen que la distancia entre ambos puntos es menor o igual que  $\varepsilon$ . Podemos considerar a ésta como una estructura de dimensión simplicial 1. Para construir una estructura geométrica de mayor dimensión simplicial, definimos por cada número natural  $k \geq 0$  el conjunto  $N_k$  dado por la colección de todos los subconjuntos con  $k + 1$  elementos  $\{x_{i_0}, \dots, x_{i_k}\} \subset N$  que satisfacen que la distancia entre cada par de elementos es menor o igual que  $\varepsilon$ . El *complejo simplicial de Vietoris-Rips*  $VR(N, \varepsilon)$  es la unión de todos los  $N_k$  (Ghrist, 2007, p. 63), y la dimensión simplicial de este complejo corresponde al valor máximo de  $k$  tal que  $N_k$  es no vacío. Los elementos en  $N_k$  son llamados  $k$ -simplejos de Vietoris-Rips.

Notemos que si la nube de puntos pertenece a un espacio euclidiano  $N \subset \mathbb{R}^d$ , entonces la estructura simplicial de Vietoris-Rips  $VR(N, \varepsilon)$  puede reformularse en términos de bolas en  $\mathbb{R}^d$  de la siguiente manera:  $\sigma \in VR(N, \varepsilon)$  si y sólo si  $B(x_i, \varepsilon/2) \cap B(x_j, \varepsilon/2) \neq \emptyset$  para todos  $x_i, x_j \in \sigma$ , donde  $B(x, r) = \{y \in \mathbb{R}^d : \text{dist}(x, y) \leq r\}$  y  $\text{dist}$  representa la distancia euclidiana. Equivalentemente,  $\sigma \in VR(N, \varepsilon)$  si y sólo si su diámetro  $\text{diam}(\sigma) = \max\{\text{dist}(x_i, x_j) : x_i, x_j \in \sigma\}$  es menor o igual que  $\varepsilon$ .

En este contexto, un  $k$ -simplejo  $\sigma = \{x_{i_0}, \dots, x_{i_k}\} \in VR(N, \varepsilon)$ , cuyos puntos están en posición general, puede identificarse con la envolvente convexa  $\Delta[x_{i_0}, \dots, x_{i_k}]$  del conjunto  $\sigma \subset \mathbb{R}^d$ , esto es, el mínimo subconjunto convexo en  $\mathbb{R}^d$  que contiene a  $\sigma$ . El conjunto  $\Delta[x_{i_0}, \dots, x_{i_k}]$  es llamado una realización geométrica del  $k$ -simplejo  $\sigma = \{x_{i_0}, \dots, x_{i_k}\}$ . Para valores pequeños de  $k$  es posible visualizar tales realizaciones geométricas como se muestra en la figura 3, donde la realización geométrica de un 0-simplejo corresponde a un punto, la de un 1-simplejo a un segmento de línea, la de un 2-simplejo a un triángulo y la de un 3-simplejo a un tetraedro.

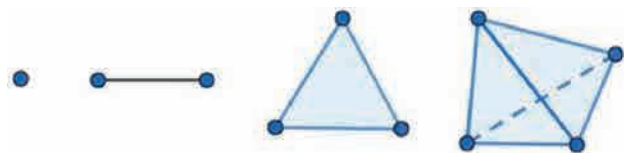


Figura 3. Realización geométrica de los  $k$ -simplejos, para  $k=0,1,2,3$ .

## El complejo simplicial de Cech

La siguiente estructura simplicial, definida también para una nube de puntos  $N \subset \mathbb{R}^d$  y un parámetro de proximidad  $\varepsilon \geq 0$ , es llamada *complejo de Cech*, denotada por  $\mathcal{C}(N, \varepsilon)$ , y es una variante del complejo de Vietoris-Rips que es de hecho una representación más fiel de la geometría subyacente de los datos (Ghrist, 2007, p. 63). Los  $k$ -simplejos de Cech son definidos de la siguiente manera:  $\sigma = \{x_{i_0}, \dots, x_{i_k}\} \in \mathcal{C}(N, \varepsilon)$  si y sólo si  $B(x_{i_0}, \varepsilon/2) \cap \dots \cap B(x_{i_k}, \varepsilon/2) \neq \emptyset$ . En equivalencia,  $\sigma \in \mathcal{C}(N, \varepsilon)$  si puede acotarse por una bola de diámetro menor o igual que  $\varepsilon$ . Podemos observar que los 0-simplejos y los 1-simplejos de Cech coinciden con los de Vietoris-Rips. Para  $k \geq 2$  todo  $k$ -simplejo  $\sigma \in \mathcal{C}(N, \varepsilon)$  satisface que  $\sigma \in VR(N, \varepsilon)$ , es decir,  $\mathcal{C}(N, \varepsilon) \subset VR(N, \varepsilon)$ , pero la contención es propia en general. Este cambio en la definición de los  $k$ -simplejos de Cech con respecto a la estructura de Vietoris-Rips tiene importantes implicaciones en los costos computacionales al momento de construir la estructura simplicial, aun cuando la estructura simplicial de Cech tiene en general una menor cantidad de simplejos que la de Vietoris-Rips (pues para su construcción se debe analizar el subconjunto formado por la intersección de bolas). Sin embargo, su uso está justificado por ser una representación más fiel de la geometría subyacente de los datos (Ghrist, 2007, p. 63). Además, la estructura simplicial de Cech aparece de manera natural en distintos estudios, como el análisis de redes (Yüchen, Jialiang y Martins, 2018; Le *et al.*, 2017).

## ESTRUCTURA FILTRADA DE CECH Y EL PROBLEMA DE LA BOLA MINIMAL

Como comentamos en la sección anterior, para determinar si  $\sigma = \{x_{i_0}, \dots, x_{i_k}\}$  es un simplejo en la estructura de Cech  $\mathcal{C}(N, \varepsilon)$ , basta con comprobar la existencia de una bola de diámetro  $\varepsilon$  que encierre al subconjunto  $\sigma \subset \mathbb{R}^d$ . Es claro que, para distintos valores del parámetro de proximidad, tenemos distintas estructuras simpliciales asociadas, como podemos ver en la figura 4, donde cada vértice corresponde a la ubicación de cada una de las antenas:

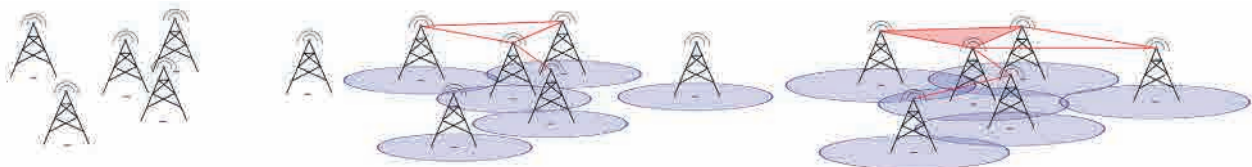


Figura 4. Distintas estructuras simpliciales de Cech.

El enfoque que aborda el ATD consiste en no fijar un valor para el parámetro de proximidad  $\varepsilon$ , sino considerar todos los valores del parámetro en cierto rango junto con las correspondientes estructuras simpliciales generadas, a fin de identificar aquellas propiedades geométricas que más persisten a través de esta familia.

Es claro que si  $\varepsilon_1 \leq \varepsilon_2$ , entonces  $\mathcal{C}(N, \varepsilon_1) \subset \mathcal{C}(N, \varepsilon_2)$ . Debido a esta propiedad, la estructura simplicial de Cech tiene una estructura filtrada de manera natural:  $\mathcal{C}(N, \varepsilon_0 = 0) \subset \mathcal{C}(N, \varepsilon_1) \subset \dots \subset \mathcal{C}(N, \varepsilon_\infty = \varepsilon)$ . Podemos reescribir  $\mathcal{C}(N, \varepsilon) = \{\sigma \in \mathcal{C}(N, \varepsilon) : \text{diam}(MB(\sigma)) \leq \varepsilon\}$ , donde  $MB(\sigma) \subset \mathbb{R}^d$  denota la bola de radio mínimo que acota al subconjunto finito  $\sigma$ , de modo que el estudio de la estructura simplicial filtrada de Cech está íntimamente relacionado con el problema de determinar la bola minimal para colecciones de puntos  $\sigma = \{x_{i_0}, \dots, x_{i_k}\}$  con  $k \leq n$ . Encontrar el centro y radio mínimo de la bola que acote una colección finita de puntos  $\sigma \subset \mathbb{R}^d$  es conocido como el problema de la *bola minimal* (*miniball problem*, en inglés). Este problema ha sido resuelto usando técnicas muy variadas (Fischer; Gärtner y Kutz, 2003; Gärtner, 1999).

## UN ALGORITMO PARA EL CÁLCULO DE LA BOLA MINIMAL

En esta sección presentamos dos algoritmos *ad hoc* para calcular la bola minimal para colecciones de tres o cuatro puntos  $\sigma$ , en un espacio euclidiano de dimensión arbitraria. El punto clave de los algoritmos consiste en identificar cuándo la bola minimal coincide con una bola circunscrita a  $\sigma$ , o bien a un subconjunto de  $\sigma$  en específico. En la siguiente sección mostraremos la comparación en tiempos con respecto al algoritmo dado por Fischer, Gärtner y Kutz (2003), que puede manejar eficientemente conjuntos arbitrarios de puntos en dimensiones altas. Nos referiremos a tal algoritmo como “minibola”. Los algoritmos propuestos en este trabajo, llamados  $MB_3$  y  $MB_4$ , reciben una colección de tres y cuatro puntos, respectivamente, y calculan la bola minimal  $MB(\sigma)$  que acota a  $\sigma$ .



## Colecciones de tres puntos

Para una colección de tres puntos  $\sigma \subset \mathbb{R}^d$  sólo se presentan dos casos para  $MB(\sigma)$ : (i) cuando la bola minimal coincide con la bola circunscrita  $CB([x_1, x_2])$  de los dos puntos más separados  $x_1$  y  $x_2$ , (ii) cuando coincide con la bola circunscrita del triángulo formado por los tres puntos  $CB([x_1, x_2, x_3])$ . Para poder distinguir qué caso debe usarse para el cálculo de la bola minimal, sólo es necesario verificar el signo del producto escalar  $\langle x_1 - x_3, x_2 - x_3 \rangle$ ; en cualquiera de los dos casos, el problema de encontrar la bola circunscrita se puede resolver con fórmulas explícitas (Gutiérrez-Moya, 2018). Esquemáticamente, el algoritmo queda descrito como sigue:

Algoritmo  $MB_3$

**Entrada:** tres puntos  $\sigma = \{x_1, x_2, x_3\} \subset \mathbb{R}^d$  en el espacio euclidiano de dimensión  $d$ .

**Salida:** la bola minimal  $MB(\sigma)$ .

1. **Renombrar** los puntos de  $\sigma = \{x_1, x_2, x_3\}$  de tal forma que  $dist(x_1, x_2) = diam(\sigma)$ .

2. Si  $\langle x_1 - x_3, x_2 - x_3 \rangle \leq 0$ , entonces

$$MB(\sigma) = CB([x_1, x_2]),$$

en otro caso  $MB(\sigma) = CB([x_1, x_2, x_3])$ .

3. **Regresar**  $MB(\sigma)$ .

## Colecciones de cuatro puntos

El algoritmo  $MB_4$  recibe una colección de cuatro puntos  $\sigma = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} \subset \mathbb{R}^d$ , y proporciona la bola minimal que acota  $\sigma$ . En este caso, la bola minimal corresponde a la bola circunscrita de alguno de los siguientes conjuntos: (i) los puntos más alejados, (ii) los vértices de alguna de las cuatro caras (triángulos) del tetraedro formado por  $\sigma$ , (iii) el tetraedro  $\Delta[x_1, x_2, x_3, x_4]$ . De modo que, esencialmente, el algoritmo  $MB_4$  consiste en iterar el algoritmo  $MB_3$  para subconjuntos de tres puntos. Esto implica que su tiempo de cómputo sea proporcional al del algoritmo  $MB_3$ . Más explícitamente, el algoritmo  $MB_4$  tiene el siguiente pseudocódigo.

Algoritmo  $MB_4$

**Entrada:** cuatro puntos  $\sigma = \{x_1, x_2, x_3, x_4\} \subset \mathbb{R}^d$  en el espacio euclidiano de dimensión  $d$ .

**Salida:** la bola minimal  $MB(\sigma)$ .

1. **Renombrar** los puntos de  $\sigma = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$  de tal forma que  $dist(x_1, x_2) = diam(\sigma)$ .

2. Si  $\langle x_1 - x_3, x_2 - x_3 \rangle \leq 0$  y  $\langle x_1 - x_4, x_2 - x_4 \rangle \leq 0$  entonces

$$MB(\sigma) = CB([x_1, x_2]),$$

ir al Paso (3)

en otro caso

para  $i=1$  hasta  $i=4$  hacer

definir  $N_i = \sigma - x_i$

si  $x_i \in MB(N_i)$  entonces

$$MB(\sigma) = MB(N_i)$$

ir al Paso (3)

fin para

calcular  $MB(\sigma) = CB([x_1, x_2, x_3, x_4])$

3. **Regresar**  $MB(\sigma)$ .

Es importante mencionar que en la codificación (en C++) del algoritmo  $MB_4$  es posible reutilizar varios de los cálculos necesarios para las iteraciones en el *paso 2*; además, todos los productos escalares pueden ser calculados a partir de las distancias entre los puntos en  $\sigma$ . Lo anterior impacta significativamente en la disminución de los tiempos de cómputo en dimensiones altas.

## EXPERIMENTACIÓN COMPUTACIONAL

A continuación, presentamos una comparación entre los tiempos de cómputo de los algoritmos  $MB_3$  y  $MB_4$ , con respecto al algoritmo propuesto por Fischer, Gärtner y Kutz (2003) al que nos referimos por "minibola"; todos codificados en el lenguaje C++. En la gráfica de arriba de la figura 5 se muestran los tiempos promedio de ejecución de los algoritmos  $MB_3$  y minibola, con respecto a la dimensión del espacio ambiente; en la gráfica de abajo se comparan los tiempos promedio de  $MB_4$  y minibola.

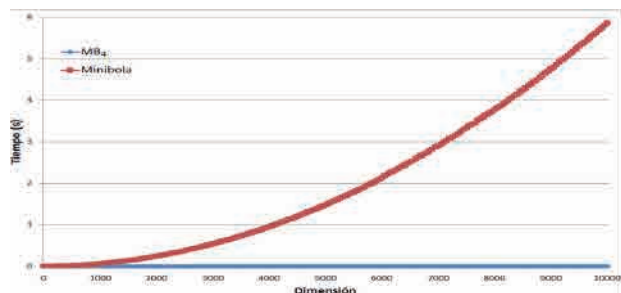
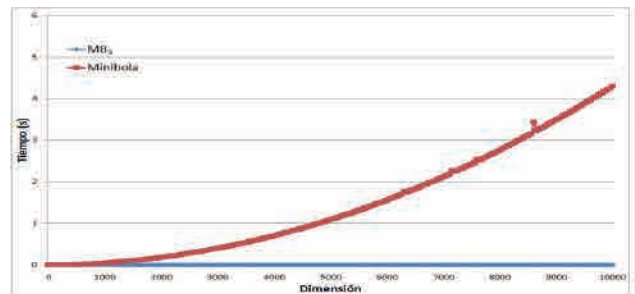


Figura 5. Comparación de tiempo de cómputo entre  $MB_3$  y  $MB_4$  versus minibola.

La experimentación computacional se realizó sobre espacios euclidianos de dimensión  $d=50k$ , con  $k=1,2,\dots,200$ . Para cada uno de tales valores  $d$  se generaron 10,000 nubes de puntos  $\{x_1, x_2, x_3\} \subset \mathbb{R}^d$ , donde cada  $x_i \in \mathbb{R}^d$  consiste de  $d$  números en el intervalo  $[0,10]$  elegidos aleatoriamente, y se calcularon los correspondientes tiempos promedio de ejecución de  $MB_3$  y minibola; y análogamente para la comparación entre los algoritmos  $MB_4$  y minibola.

Los cálculos se realizaron ejecutando un proceso por cada hilo sobre un procesador Intel Xeon E5-2698v4 a 2.2 GHz. El uso de memoria RAM fue mínimo. La experimentación muestra que el algoritmo minibola es de orden cuadrático, lo cual es consistente con lo presentado en Fischer, Gärtner y Kutz (2003). Por otro lado, los algoritmos  $MB_3$  y  $MB_4$  son de orden lineal y el tiempo promedio de cómputo es del orden  $10^{-5}$ , aproximadamente. Tanto los fundamentos matemáticos como los códigos en C++ de este trabajo pueden consultarse en Gutiérrez-Moya, 2018.

## CONCLUSIÓN

En la primera parte de este trabajo describimos cómo puede dotarse de distintas geometrías a una base de datos, vista como una nube de puntos, mediante dos de las estructuras más usuales: los complejos simpliciales de Vietoris-Rips y de Čech. Posteriormente enunciamos el problema de la bola minimal y comentamos su relevancia para la construcción de la filtración del complejo de Čech. Concluimos con la propuesta de dos algoritmos  $MB_3$  y  $MB_4$ , cuyas complejidades son de orden lineal y que permiten calcular los simplejos de Čech de dimensión simplicial dos y tres de manera sumamente eficiente, aun cuando la nube de puntos pertenece a un espacio euclidiano de dimensión alta.

La desventaja de los algoritmos  $MB_3$  y  $MB_4$  es que no son adecuados para generalizarse a dimensión simplicial arbitraria. Aun cuando la codificación en el lenguaje de programación se vuelve bastante sofisticada, realmente el obstáculo principal radica en la complejidad algorítmica. Por ejemplo, si construimos el algoritmo  $MB_5$  siguiendo la misma metodología que para  $MB_3$  y  $MB_4$ , entonces tal algoritmo iteraría cinco veces al algoritmo  $MB_4$ , el cual, a su vez, itera cuatro veces a  $MB_3$ ; en general,  $MB_n$  estaría iterando  $n \cdot (n - 1) \cdot \dots \cdot 4$  veces a  $MB_3$  y la eficiencia que se mostró en la sección relativa a la experimentación computacional se vería significa-

tivamente disminuida, incluso para valores de  $n$  no muy grandes.

Por otro lado, aunque una gran cantidad de los datos que se generan actualmente en nuestra sociedad son de naturaleza altamente multidimensional, los aspectos que suelen estudiarse en una primera instancia en el análisis topológico de datos son los relativos a la clasificación (*análisis de clúster*) y si la variabilidad de los datos puede ser representada significativamente mediante un modelo periódico de baja dimensión simplicial. Sin embargo, un análisis topológico de una base de datos multivariada que requiera una estructura simplicial de Čech tendrá, en general, una cantidad considerable de  $k$ -simplejos de Čech y su análisis mediante las librerías usuales será computacionalmente costoso, es aquí donde radica la importancia para el ATD de contar con algoritmos eficientes como  $MB_3$  y  $MB_4$ .

## AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo fue desarrollado gracias al apoyo y financiamiento del Prodep a través del Proyecto "Métodos de topología combinatoria en el análisis de datos" (511-6/17-7715). Los autores agradecen al Área de Cómputo de Alto Rendimiento de la Universidad de Sonora (ACARUS) por el apoyo proporcionado para el uso de su infraestructura de supercómputo.

## REFERENCIAS

- Carlsson, G., Zomorodian, A., Collins, A., et al. (2004). Persistence barcodes for shapes. *Proceedings of the 2004 Eurographics/ACM SIGGRAPH symposium on Geometry processing-SGP'04*. pp. 124-135. DOI:10.1145/1057432.1057449.
- Fischer, K., Gärtner, B. y Kutz, M. (2003). Fast Smallest-Enclosing-Ball Computation in High Dimensions. *Algorithms-ESA 2003*. pp. 630-641. DOI:10.1007/978-3-540-39658-1\_57.
- Gärtner, B. (1999). Fast and Robust Smallest Enclosing Balls. *Algorithms-ESA'99*. pp. 325-338. DOI:10.1007/3-540-48481-7\_29.
- Ghrist, R. (2007). Barcodes: The persistent topology of data. *Bulletin of the American Mathematical Society*. 45(1): 61-75. DOI:10.1090/s0273-0979-07-01191-3.
- Gutiérrez-Moya, Y. (2018). *Complejo simplicial de Čech de baja dimensión: Un algoritmo ad hoc para su construcción*. Universidad de Sonora, Tesis de Licenciatura. URL <http://lic.mat.uson.mx>

- Le, N., Vergne, A., Martins, P., *et al.* (2017). Optimize wireless networks for energy saving by distributed computation of Čech complex. *2017 IEEE 13th International Conference on Wireless and Mobile Computing, Networking and Communications (WiMob)*. DOI: 10.1109/WiMOB.2017.8115760.
- Nicolau, M., Levine, A. y Carlsson, G. (2011). Topology based data analysis identifies a subgroup of breast cancers with a unique mutational profile and excellent survival. *Proceedings of the National Academy of Sciences*. 108(17): 7265-7270. DOI:10.1073/pnas.1102826108.
- Otter, N., Porter, M.A., Tillmann, U., *et al.* (2017). A roadmap for the computation of persistent homology. *EPJ Data Science*. 6(17). DOI:10.1140/epjds/s13688-017-0109-5.
- Piangerelli, M., Rucco, M., Tesei, L., *et al.* (2018). Topological classifier for detecting the emergence of epileptic seizures. *BMC Res Notes*. 11:392. DOI:10.1186/s13104-018-3482-7.
- Pranav, P., Edelsbrunner, H., van de Weygaert, R., *et al.* (2017). The topology of the cosmic web in terms of persistent Betti numbers. *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 465(4): 4281-4310. DOI:10.1093/mnras/stw2862.
- Taylor, D., Klimm, F., Harrington, H., *et al.* (2015). Topological data analysis of contagion maps for examining spreading processes on networks. *Nature Communications*. 6(1). DOI: 10.1038/ncomms8723.
- Yuchen, W., Jialiang, L. y Martins, P. (2018). Distributed Coverage Hole Detection Algorithm Based on Čech Complex. *Communications and Networking*. pp. 165-175. DOI:10.1007/978-3-319-78139-6\_17.
- Zomorodian, A. (2012). Topological Data Analysis. In: A. Zomorodian (ed.), *Advances in Applied and Computational Topology*. Providence, Rhode Island: American Mathematical Society. pp. 1-39. DOI:10.1090/psa-pm/070.

RECIBIDO: 02/07/2018  
 ACEPTADO: 12/03/2019



# Optimización matemática multiobjetivo: un procedimiento metaheurístico inteligente aplicado a la segmentación de mercado en una empresa embotelladora

Roger Z. Ríos Mercado\*, M. Angélica Salazar-Aguilar\*

DOI: / 10.29105/cienciauanl22.96-5

## RESUMEN

En este trabajo se aborda un problema de diseño territorial motivado por una problemática real en el sector de repartición de bebidas embotelladas. Éste es un problema de toma de decisiones donde debe decidirse cómo particionar el conjunto de manzanas geográficas de una ciudad en varios territorios para eficientar las tareas y el servicio proporcionado por la empresa a sus clientes. El problema se plantea como una cuestión de optimización biobjetivo, donde se desea optimizar simultáneamente dos medidas de desempeño: la dispersión territorial y el desbalance territorial respecto a la demanda del producto. El problema está también sujeto a restricciones de balance con respecto al número de clientes y conectividad territorial. Para resolver este complejo problema se ha desarrollado e implementado una metaheurística multiobjetivo basada en búsqueda dispersa. Se presenta una evaluación computacional donde se demuestra el excelente desempeño del método propuesto, superando incluso a los mejores dos métodos conocidos a nivel mundial para problemas de optimización multiobjetivo (NSGA-II y SSPMO).

Palabras clave: investigación de operaciones, diseño de territorios, optimización multiobjetivo, metaheurísticas.

En este trabajo se aborda un problema de diseño de territorios comerciales, el cual consiste en dividir un conjunto dado de unidades básicas (UBs) en  $p$  grupos llamados territorios, de acuerdo a algunos criterios específicos de planeación. Se considera una versión biobjetivo del problema, es decir, se optimizan simultáneamente dos funciones objetivo.

La versión monoobjetivo de este problema fue introducida por Ríos-Mercado y Fernández (2009). Debido a la complejidad del problema, ellos desarrollaron un procedimiento GRASP (*Greedy Randomized Adaptive Search Procedure*) reactivo para

## ABSTRACT

*A territory design problem motivated by a real-world application in the bottled beverage distribution industry is addressed in the present research. The problem is categorized as a decision-making problem, where suitable partition of customers or city blocks in a city into territories must be decided, such that companies can provide a better service. The problem was modeled as a bi-objective optimization problem, where two performance responses are simultaneously optimized; (i) territory dispersion and (ii) territory imbalance with respect to product demand. The problem is subject to balancing with respect to the number of customers and territory connectivity constraints. To solve the complex problem, a scatter search-based multi-objective metaheuristic method has been developed and implemented. An empirical assessment showed the performance of the proposed method, outperforming the two most popular methods used worldwide (NSGA-II and SSPMO).*

*Keywords: operations research, territory design, multi-objective optimization, metaheuristics.*

resolverlo. El procedimiento que propusieron superó el método utilizado en la compañía, tanto en la calidad de la solución como en el grado de infactibilidad con respecto a los requerimientos de balance. También se han estudiado diferentes versiones monoobjetivo de este problema (López-Pérez y Ríos-Mercado, 2013; Ríos-Mercado y López-Pérez, 2013; Ríos-Mercado y Escalante, 2016).

En relación a estudios multiobjetivo para otros problemas de distritos, hay algunas pocas aplicaciones, por ejemplo, en distritos políticos (Bong y Wang, 2004), distritos escolares

\* Universidad Autónoma de Nuevo León.

Contacto: roger.rios@uanl.edu.mx

(Bowerman, Hall y Calamai, *et al.*, 1995) y servicios públicos (Tavares-Pereira *et al.*, 2007). Sin embargo, éstos son modelos diferentes al que se estudia en este trabajo. Antes de realizar este proyecto, los únicos trabajos en diseño de territorios comerciales multiobjetivo eran los de Salazar-Aguilar *et al.* (2011a; 2013). En el primero, se introdujo el modelo biobjetivo y se propuso un método mejorado del  $\epsilon$ -constraint para encontrar las fronteras óptimas de Pareto. Una de las limitaciones de este trabajo es, por supuesto, el tamaño de las instancias que podrían ser resueltas de forma exacta. La instancia más grande que se puede tratar con ese método tiene 150 UBs y seis territorios. En el segundo trabajo se desarrollaron heurísticas basadas en GRASP para tratar de abordar instancias de gran escala del problema, el desempeño de los métodos fue relativo. Por tanto, la motivación del presente trabajo fue el de desarrollar un mejor método y más efectivo para abordar instancias grandes del problema de diseño de territorios comerciales (TDP, por sus siglas en inglés). Para mayor detalle acerca de otras aplicaciones de TDP mono-objetivo, el lector puede referirse al trabajo de Kalcsics y Ríos-Mercado (Kalcsics y Ríos-Mercado, 2019).

En este trabajo se desarrolló una metaheurística basada en búsqueda dispersa (SS). El método de búsqueda dispersa para diseño de territorios multiobjetivo (SSMTDP, por sus siglas en inglés) propuesto en este trabajo fue evaluado en un conjunto de instancias grandes. Los resultados indican que el SSMTDP es capaz de encontrar buenas soluciones que están muy bien distribuidas a lo largo de la frontera eficiente. Incluso si las soluciones iniciales tienen una evaluación pobre en las funciones objetivo, el método de combinación propuesto tiene la habilidad de explorar nuevas regiones en el espacio de búsqueda y el método mejorado permite obtener mejores soluciones que están bastante lejos del conjunto inicial. Cuando se comparó con el estado del arte de los métodos multiobjetivo como el procedimiento de búsqueda dispersa tabú para optimización multiobjetivo (SSPMO) y el algoritmo genético de clasificación no-dominada (NSGA-II), se encontró que estos procedimientos se esforzaron bastante para generar soluciones factibles del problema. Se observó que pocas instancias pueden ser resueltas con estos procedimientos. En contraste, el SSMTDP reportó soluciones significativamente mejores para aquellas instancias resueltas tanto por SSPMO como por NSGA-II.

## DESCRIPCIÓN DEL PROBLEMA

Dado un conjunto  $V$  de manzanas (unidades básicas, UBs), la compañía desea dividir este conjunto en un número fijo ( $p$ ) de territorios disjuntos satisfaciendo algunos criterios de planeación como balance, conectividad y compacidad. Se requiere

el balance en los territorios para asegurar una mejor distribución de la carga de trabajo. La conectividad garantiza la movilidad dentro de los territorios, es decir que, cada territorio tiene que estar conectado de tal forma que se pueda llegar a cada unidad básica desde cualquier otra sin salir del territorio. La compacidad del territorio se requiere para garantizar que los clientes dentro del territorio estén relativamente cerca unos de otros. La compañía identifica a la compacidad y el balance respecto al número de clientes como los criterios más importantes. Por tanto, en el presente trabajo estos criterios son considerados como funciones objetivo y los criterios restantes se tratan como restricciones.

Sea  $G = (VE)$ , donde  $E$  es el conjunto de aristas que representan la adyacencia entre UBs. Una arista  $e \in E$  conectando a los nodos  $i$  y  $j$  existe si  $i$  y  $j$  son UBs adyacentes. A cada nodo  $j \in V$  se le asocian múltiples atributos como coordenadas geográficas ( $c_j^x, c_j^y$ ), número de clientes y volumen de ventas. Específicamente, la compañía desea un balance perfecto entre los territorios, es decir, cada territorio debe contar con la misma cantidad de clientes y el mismo volumen de ventas. Sea  $K$  el conjunto de índices de territorios tal que  $|K|=p$ . Sea  $A = \{1,2\}$  el conjunto de actividades nodales, donde 1 es el número de clientes y 2 el volumen de ventas. Definimos el tamaño del territorio  $X_k$  con respecto a la actividad  $a$  como  $w^{(a)}(X_k) = \sum_{i \in X_k} w_i^{(a)}$ , donde  $w_i^{(a)}$  es el valor asociado a la actividad  $a \in A$  en el nodo  $i \in V$ . El valor promedio (deseado) está dado por  $\mu^{(a)} = \sum_{i \in X_k} w_i^{(a)} / p$ . Debido a la naturaleza discreta de este problema, es prácticamente imposible tener territorios perfectamente balanceados. Por consiguiente, se introdujo un parámetro de tolerancia  $\tau^{(2)}$  para el volumen de ventas que permite una desviación relativa con respecto al valor promedio  $\mu^{(2)}$ . Para medir la dispersión utilizamos la medida de dispersión del conocido problema de la  $p$ -mediana. Bajo los supuestos anteriores, el modelo combinatorio biobjetivo puede escribirse como:

$$\begin{aligned} \min_{X \in \Pi} f_1(X) &= \sum_{k \in K} \sum_{i \in X_k} d_{ic(k)} & (1) \\ \min_{X \in \Pi} f_2(X) &= \max_{k \in K} \frac{1}{\mu^{(1)}} [\max\{w^{(1)}(X_k) - \mu^{(1)}, \mu^{(1)} - w^{(1)}(X_k)\}] & (2) \\ \text{Sujeto a:} & & \\ w^{(2)}(X_k) &\leq (1 + \tau^{(2)})\mu^{(2)}, \quad k \in K & (3) \\ w^{(2)}(X_k) &\geq (1 - \tau^{(2)})\mu^{(2)}, \quad k \in K & (4) \\ G_k &= (X_k, E(X_k)) \text{ es conexo; } k \in K & (5) \end{aligned}$$

El objetivo es encontrar una  $p$ -partición  $X = (X_1, \dots, X_p)$  de  $V$ , tal que, tanto la dispersión (1) en cada territorio como la desviación máxima relativa con respecto al número de clientes en cada territorio (2) sean minimizados simultáneamente. Las restricciones (3)-(4) establecen que el tamaño del territorio (volumen de ventas) debe estar entre el rango permitido por el parámetro de tolerancia  $\tau^{(2)}$ . Las restricciones (5) aseguran la conectividad de cada territorio, donde  $G_k$  es el grafo inducido en  $G$  por el conjunto de nodos  $X_k$ . El problema anterior es NP-duro (Salazar-Salazar-Aguilar, 2011b).

# PROCEDIMIENTO DE SOLUCIÓN PROPUESTO

El enfoque evolutivo llamado búsqueda dispersa (SS, por sus siglas en inglés) se basa en diversificar la búsqueda en el espacio de soluciones. Opera sobre un conjunto de soluciones denominado el conjunto de referencia, formado por soluciones buenas y diversas de la población principal. Éstas son combinadas con el propósito de generar nuevas soluciones con mejor valor objetivo, mientras se mantiene la diversidad. La estructura básica de SS (Martí, Laguna y Glover, 2006) está formada por cinco módulos principales. La figura 1 ilustra la representación esquemática del SS propuesto, donde se muestra cómo interactúan los módulos.

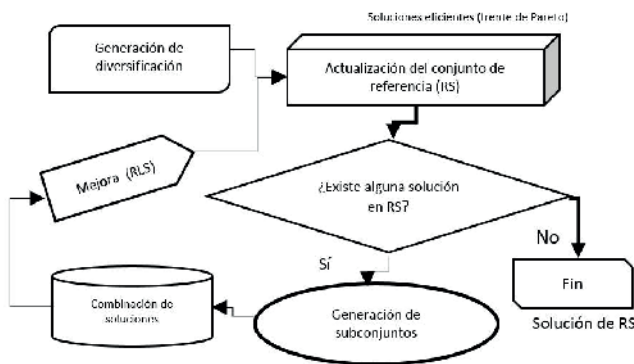


Figura 1. Diagrama de la metaheurística de búsqueda dispersa.

SS es una técnica muy flexible debido a que algunos módulos de su estructura pueden definirse de acuerdo al problema bajo estudio. Por ejemplo, en este trabajo, los módulos de diversificación, mejora y combinación se propusieron e implementaron *ad hoc* para este problema específico, para tratar de aprovechar su estructura. En nuestro diseño, el módulo de diversificación genera un conjunto de soluciones iniciales apoyado en estrategias de GRASP, en las cuales la función voraz está basada en las dos funciones objetivo del problema. El módulo de mejora trata de optimizar una solución dada utilizando una estrategia de búsqueda local encadenada para problemas multiobjetivo, utilizando las funciones objetivo del problema una a la vez de forma secuencial. El módulo de combinación de soluciones transforma dos soluciones dadas en una o más soluciones (hijos), tratando de mantener características buenas de las soluciones combinadas; el módulo de generación de subconjuntos genera las soluciones a ser combinadas en el módulo anterior. En esta aplicación específica se generan exactamente tres soluciones hijo de dos diseños de territorio dados. Estos tres módulos del problema específico se describen completamente en Salazar-Aguilar *et al.* (2012). Finalmente, los dos módulos restantes, los cuales no son dependientes del problema, son el módulo de actualización

del conjunto referencia y el módulo de generación de conjuntos. El primero de los módulos mantiene una porción de las mejores soluciones en el conjunto referencia. En este caso, el conjunto referencia está formado por soluciones no-dominadas que van de acuerdo al criterio de Pareto, donde se consideraron ambas funciones objetivo del problema. Cuando se encuentra una solución no-dominada, ésta entra al conjunto de referencia y aquellas soluciones que son dominadas por la solución que se agregó son eliminadas del conjunto de referencia. El módulo de generación de subconjuntos actúa en el conjunto de referencia, en éste los subconjuntos de soluciones que deben ser combinados son creados por todos los pares de soluciones posibles del conjunto de referencia.

Durante cada iteración del SSMTDP, se utilizó una memoria temporal para evitar combinaciones que fueron realizadas en la iteración previa. En otras palabras, para una iteración específica, el proceso de combinación se aplica sólo para aquellos pares de soluciones que no fueron combinados en la iteración anterior:

## TRABAJO EXPERIMENTAL

El procedimiento fue programado en C++, y compilado en Sun C++ versión 8.0 bajo el sistema operativo Solaris 9, y se ejecutó en un SunFire V440. Los conjuntos de datos se tomaron de la base de datos (Ríos-Mercado y Fernández, 2009). Estos conjuntos de datos contienen instancias generadas aleatoriamente basadas en datos reales proporcionados por una compañía. El SSMTDP se aplicó sobre dos conjuntos de instancias con  $(n,p) \in \{(500,20),(1000,50)\}$ . Para cada conjunto se generaron diez instancias y se utilizó un parámetro de tolerancia  $\tau^{(2)} = 0.05$  para todos ellos. Se utilizaron dos criterios de parada en el SSMTDP, límite de iteraciones y convergencia. En estos experimentos, el número máximo de iteraciones es 10.

Durante el trabajo experimental, se observó que el SSMTDP convergió sin alcanzar el número máximo de iteraciones en todas las instancias probadas. Así, en todos los casos el SSMTDP se detuvo cuando no hubo nuevas soluciones para agregarse al conjunto de referencia. La figura 2 muestra el desempeño del SSMTDP para la instancia DU500-08, con 500 UBs y 20 territorios. La primera frontera (BGRASP-I) es el conjunto de soluciones iniciales generado por el módulo de diversificación (BGRASP-I). Las siguientes fronteras muestran las soluciones que pertenecen al conjunto de referencia en cada iteración del SSMTDP. Recuerde que el SSMTDP comienza con un conjunto de soluciones no-dominadas que se obtiene a través del módulo de diversificación. Estas soluciones se asignan al conjunto de referencia inicial. Después de eso, cada par de soluciones en el conjunto de referencia es combinado para generar tres soluciones diferentes. Las nuevas soluciones generadas son

mejoradas a través del RLS y después se actualiza el conjunto de referencia obtenido, así se genera un nuevo conjunto de referencia. Cuando el conjunto de referencia ya no cambia, el SSMTDP se detiene. En el caso mostrado en la figura 2, el SSMTDP converge en la iteración 9. Es decir, en esta iteración, la combinación de las soluciones del conjunto de referencia no produjo soluciones no-dominadas para agregarse al conjunto de referencia. De esta manera, el SSMTDP reporta como conjunto de soluciones no-dominadas a aquéllas que pertenecen al conjunto de referencia en la última iteración.

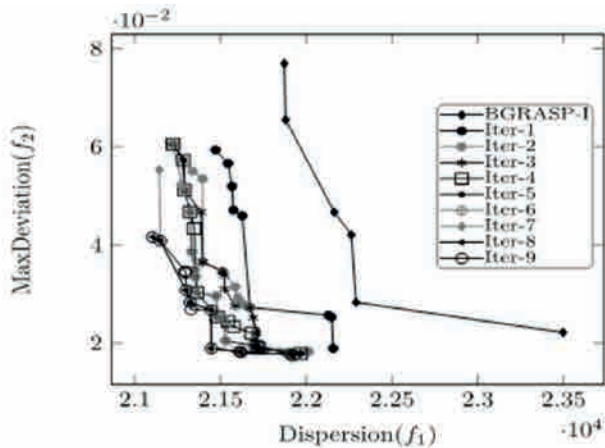


Figura 2. Desempeño de SSMTDP, instancia DU1000-08.

Para mostrar el comportamiento del SSMTDP utilizando instancias de tamaño (1000,50), la figura 3 muestra las iteraciones del SSMTDP para la instancia denominada DU1000-04, la cual tiene 1000 UBs y 50 territorios. En este caso, el SSMTDP se detuvo en la iteración 8. En resumen, las fronteras eficientes aproximadas obtenidas por el SSMTDP representan una mejora significativa con respecto a las fronteras iniciales obtenidas por el BGRASP-I. Se observó que en todas las instancias probadas (20 instancias), el método SSMTDP se detuvo por convergencia.

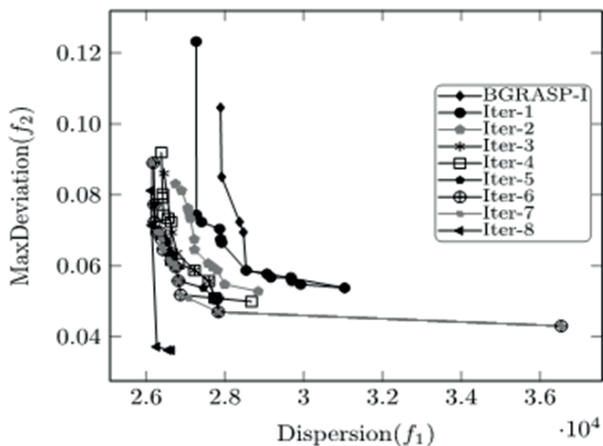


Figura 3. Desempeño de SSMTDP, instancia DU1000-04.

En las siguientes secciones se compara el SSMTDP con otras dos heurísticas del estado del arte, NSGA-II y SSPMO.

Se han utilizado diferentes medidas de desempeño para evaluar la calidad de las soluciones obtenidas desde el enfoque multiobjetivo. Aquí consideramos las medidas más populares reportadas en la bibliografía de optimización multiobjetivo (Salazar-Aguilar *et al.*, 2012):

1. Número de puntos en la frontera no-dominada. Es una medida importante ya que las fronteras no-dominadas que proveen más alternativas al tomador de decisiones son preferidas en lugar de aquéllas que contienen pocas.

2.  $k$ -distancia. Esta métrica es la distancia euclidiana desde un punto no-dominado al  $k$ -ésimo punto no-dominado más cercano. Debido a que la  $k$ -distancia está definida para un solo punto en la frontera, se consideran dos medidas en la evaluación de los resultados, específicamente, el promedio y los valores  $k$ -distancia máximos calculados sobre todos los puntos de la frontera obtenidos por el método. Por consiguiente, cuanto más pequeña es la  $k$ -distancia para los puntos en la frontera, la densidad de la frontera es mejor. En este trabajo se utiliza  $k=4$ .

3. Tamaño del espacio cubierto ( $SSC(X)$ ). Para un conjunto de puntos dado  $X$ ,  $SSC(X)$  es el volumen de los puntos dominados por  $X$ . Entonces, cuanto más grande es el valor de  $SSC(X)$ ,  $X$  es mejor. Específicamente, sea  $X = (X^1, \dots, X^k)$  un conjunto de  $k$  vectores de decisión. La función  $SSC(X)$  da el volumen incluido por la unión de los polítopos  $P^1, \dots, P^k$ , donde cada  $P^i$  se forma por las intersecciones de los siguientes hiperplanos originados por  $X^i$ , junto con los ejes: para cada eje en el espacio objetivo, existe un hiperplano perpendicular al eje y pasa a través del punto  $(f_1(X^1), \dots, f_k(X^k))$ . En el caso de dos dimensiones, cada  $P^i$  representa un rectángulo definido por los puntos  $(0,0)$  y  $(f_1(X^1), f_2(X^2))$ . Para evitar calcular volúmenes infinitos, el volumen calculado es dividido por el volumen de un hipercubo de referencia (ajustando tanto las cotas superiores como inferiores para cada objetivo) así el resultado final es mostrado en porcentaje.

4.  $C(A,B)$ . Es conocido como la medida de cobertura de dos conjuntos. Esta medida representa la porción de puntos en la frontera eficiente  $B$  que son dominados por los puntos de la frontera  $A$ . Así,  $C(A,B)$  es la cobertura de  $B$  por puntos en  $A$ .

## Comparación entre NSGA-II, SSPMO y SSMTDP

SSPMO es una metaheurística introducida por Molina *et al.* (2007) desarrollada inicialmente para resolver problemas de optimización no lineal multiobjetivo; sin embargo, también se ha adaptado para problemas combinatorios multiobjetivo. Éste consiste en un procedimiento de búsqueda

dispersa/tabú híbrido que incluye dos diferentes fases: (i) generación de un conjunto inicial de puntos no-dominados a través de la búsqueda (MOAMP) local encadenada (tabú), y (ii) combinación de soluciones y actualización del conjunto no-dominado mediante búsqueda dispersa.

El algoritmo genético de clasificación no-dominada (NSGA-II) es un algoritmo evolutivo que se ha aplicado con éxito a muchos problemas de optimización combinatoria multiobjetivo en la bibliografía (Deb *et al.*, 2002), y es el método más citado en metaheurísticas multiobjetivo. Los detalles de cómo éstos fueron implementados en nuestro estudio están en Salazar-Aguilar *et al.* (2012).

El NSGA-II se aplicó a los dos conjuntos de datos anteriormente descritos. El número de generaciones y el tamaño de la población se establecieron en 500. En cada generación se combinaron 250 soluciones. NSGA-II reportó soluciones no-dominadas sólo para la instancia DU500-04 (tablas I y II), la cual tiene 500 UBs y 20 territorios. Para las otras 19 instancias probadas, NSGA-II no brindó soluciones factibles, mientras que el procedimiento SSMTDP reportó soluciones no-dominadas para todas las instancias probadas. Se observó cómo NSGA-II falló en manejar apropiadamente las restricciones de conexidad. La mayoría de las soluciones generadas por NSGA-II son altamente infactibles respecto a las restricciones de conexidad, aun cuando NSGA-II considera este requerimiento como objetivo que debe ser minimizado. Los mecanismos de selección y los módulos de combinación no son suficientes para manejar estas restricciones difíciles. En contraste, el procedimiento propuesto SSMTDP está específicamente diseñado para tomar en cuenta la conexidad en todos sus componentes. Entonces, para este problema, aprovechar su estructura definitivamente vale la pena. La figura 4 muestra la comparación entre los procedimientos SSMTDP, SSPMO y NSGA-II.

Tabla I. Resumen de métricas para la instancia DU500-04, donde  $NP(X)$  se refiere al número de puntos en la frontera no-dominada  $X$ .

Procedimiento	$NP(X)$	$k$ -distancia(min)	$k$ -distancia(max)	$SSC(X)$
SSPMO	13.00	0.20	0.62	0.38
NSGA-II	4.00	-	-	0.43
SSMTDP	13.00	0.13	0.32	0.97

Tabla II. Cobertura de dos conjuntos  $C(A,B)$ , instancia DU500-04.

$C(A,B)$	SSPM	NSGA-II	SSMTDP
SSPMO	0.00	0.00	0.00
NSGA-II	0.15	0.00	0.00
SSMTDP	1.00	1.00	0.00

Observe que pocas soluciones no-dominadas de SSPMO son dominadas por el conjunto no-dominado reportado por NSGA-II. Además, tanto SSPMO como SSMTDP reportaron puntos no-dominados en una región que no está cubierta por la frontera de Pareto obtenida por NSGA-II.

La tabla I muestra nuevamente la superioridad de SSMTDP que claramente supera a NSGA-II y SSPMO, demostrando la eficiencia del método propuesto. Analizamos el caso particular (instancia DU500-04) en el cual NSGA-II reportó soluciones factibles. Note que en la  $k$ -distancia (media y max), los valores correspondientes para NSGA-II no pueden ser calculados dado que se utilizó  $k=4$ . La cobertura de dos conjuntos medida  $C(A,B)$  se muestra en la tabla II, en esta tabla el conjunto  $A$  se asocia con las filas y  $B$  con las columnas. Observe que los puntos obtenidos por NSGA-II dominaron algunos puntos obtenidos por SSPMO. La tabla II muestra que NSGA-II domina 15% de los puntos reportados por SSPMO. Para esta métrica, SSMTDP domina las fronteras reportadas por NSGA-II y SSPMO (vea figura 4). Además, NSGA-II reportó soluciones factibles sólo para una instancia de las 20 utilizadas, mientras que SSMTDP reportó soluciones factibles para todas las instancias. En resumen, SSMTDP supera a ambos procedimientos, NSGA-II y SSPMO.

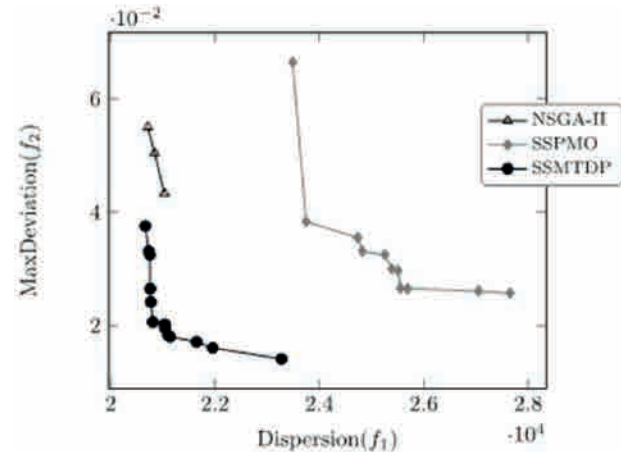


Figura 4. Fronteras aproximadas de Pareto reportadas por NSGA-II, SSPMO y SSMTDP, instancia DU500-04.

## CONCLUSIONES

En este trabajo se describe un procedimiento heurístico innovador basado en búsqueda dispersa para el problema biobjetivo de diseño territorial comercial. Cada componente del método propuesto llamado SSMTDP se diseñó tomando ventaja de la estructura del problema. En las pruebas computacionales, el método superó significativamente a los mejores métodos existentes (SSPMO y NSGA-II). Desde la perspectiva práctica,



el método es muy útil para asistir a los tomadores de decisiones, ya que al generar diversas soluciones no dominadas, éstas típicamente se discuten entre paneles de decisores donde se argumentan las preferencias por las diferentes funciones objetivo. Al final, entre los decisores se propone una solución que representa el mejor compromiso.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue apoyado por el Conacyt (apoyos 48499-Y y 61903) y la UANL (Paicyt CE012-09). El segundo autor agradece la beca doctoral de la UANL (beca NL-2006-C09-32652).

## REFERENCIAS

- Bong, C.W., y Wang, Y.C. (2004). A multiobjective hybrid metaheuristic approach for GIS-based spatial zone model. *Journal of Mathematical Modelling and Algorithms* 3(3):245-261.
- Bowerman, R., Hall, B., y Calamai, P. (1995). A multi-objective optimization approach to urban school bus routing: Formulation and solution method. *Transportation Research Part A* 29(2):107-123.
- Deb, K., Pratap, A., Agarwal, S., et al. (2002). A fast elitist multiobjective genetic algorithm: NSGA-II. *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* 6(2):182-197.
- Kalcsics, J., y Ríos-Mercado, R.Z. (2019). Districting problems. En *Location Science*, 2a edición, Capítulo 25. Springer, Cham, Suiza. Aceptado.
- López-Pérez, J.F., y Ríos-Mercado, R.Z. (2013). Embotelladoras ARCA uses operations research to improve territory design plans. *Interfaces* 43(3):209-220.
- Martí, R., Laguna, M., y Glover, F. (2006). Principles of scatter search. *European Journal of Operational Research* 169(2):359-372.
- Molina, J., Martí, R., y Caballero, R. (2007). SSPMO: A scatter tabu search procedure for non-linear multiobjective optimization. *INFORMS Journal on Computing* 19(1):91-100.
- Ríos-Mercado, R.Z., y Fernández, E. (2009). A reactive GRASP for a commercial territory design problem with multiple balancing requirements. *Computers & Operations Research* 36(3):755-776.
- Ríos-Mercado, R.Z., y López-Pérez, J.F. (2013). Commercial territory design planning with realignment and disjoint assignment requirements. *Omega* 41(3):525-535.
- Ríos-Mercado, R.Z., y Escalante, H.J. (2016). GRASP with path relinking for commercial districting. *Expert Systems with Applications* 44:102-113.
- Salazar-Aguilar, M.A., Ríos-Mercado, R.Z., y González-Velarde, J.L. (2011a). A bi-objective programming model for designing compact and balanced territories in commercial districting. *Transportation Research Part C: Emerging Technologies* 19(5):885-895.
- Salazar-Aguilar, M.A., Ríos-Mercado, R.Z., y Cabrera-Ríos, M. (2011b). New models for commercial territory design. *Networks & Spatial Economics* 11(3):487-507.
- Salazar-Aguilar, M.A., Ríos-Mercado, R.Z., González-Velarde, J.L., et al. (2012). Multiobjective scatter search for a commercial territory design problem. *Annals of Operations Research* 199(1):343-360.
- Salazar-Aguilar, M.A., Ríos-Mercado, R.Z., y González-Velarde, J.L. (2013). GRASP strategies for a bi-objective commercial territory design problem. *Journal of Heuristics* 19(2):179-200.
- Tavares-Pereira, F., Figueira, J.R., Roy, B., et al. (2007). Multiple criteria districting problems: The public transportation network pricing system of the Paris region. *Annals of Operations Research* 154(1):69-92.

RECIBIDO: 20/04/2018  
ACEPTADO: 29/06/2019



# Si mi casa es tu casa...

ARMANDO V. FLORES SALAZAR\*

◆ Siempre que me hacen una invitación que implique visitar la plaza principal y el centro histórico del municipio de San Pedro Garza García, en Nuevo León, la acepto de inmediato sin titubeos y con un tanto de

alegría, la razón de ello es porque me permite volver a ver la Casa del Ayuntamiento o Palacio Municipal, que proyecté para el aspirante a alcalde –y luego alcalde– Enrique García Leal, en 1974, hace más de cuatro décadas.

\* Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Contacto: armando.floressl@uanl.mx

En esta ocasión quien me llamó fue Carlos González, del Colegio de Cronistas e Historiadores, para invitarme a participar en una charla en el Museo El Centenario, con el único propósito de continuar insistiendo ante las autoridades municipales para recuperar la capilla religiosa que se supone –por el hecho de estar allí todavía– fue parte de la hacienda del capitán Miguel Montemayor y su esposa Mónica Rodríguez, fundadores en tiempo colonial de la Estancia de los Nogales, lo que devino en el tiempo con lo que hoy se denomina cabecera municipal del municipio de San Pedro Garza García, Nuevo León.



Llegué al frescor mañanero de la plaza arbolada un poco antes de la cita, lo que me permitió caminarla sin prisa con rumbo al Museo, vecino de ella en la esquina sur oriente. Al no ver movimiento alguno en la puerta del museo, volví a experimentar la desagradable sensación de haberme equivocado de día o de hora de la convocatoria, pero no, porque recordé que la invitación telefónica fue reiterativa de “mañana en la mañana, cabrón, a las nueve, por favor no me vayas a fallar”. Llego a la puerta de madera tablereada y me asomo por los postigos abiertos, desde el interior se aproxima balanceándose a paso lento el guardia de turno, me da paso al recibidor del recinto y también se muestra extrañado por la ausencia de los demás invitados.

El Museo, adaptado en una vieja casona de familia, también exudaba fresca, tranquilidad y quietud; dándole uso al tiempo de espera me adentro en las salas de la izquierda donde la curaduría muestra cómo vivía una típica familia sampetrina, todavía a principios del siglo XX o poco antes de la actual modernidad: mobiliario de madera en todas las habitaciones, iluminación nocturna con lámparas de petróleo, cocina con jarros y cazuelas a fuego de leña en la chimenea de tiro; garabatos para colgar canastas de alimentos a salvo de gatos y perros; mesas, camas y ventanales sobrevestidas con telas de algodón deshilado o bordado con explosión de colores; lavamanos portátil para el aseo personal y bacinica de peltre bajo la cama para el descanso nocturno de las necesidades corporales, retratos de familiares en tonos sepías enmarcados en formatos circulares y ovoides, arcones o "castañas" de marquetería para el guardado de ropas finas y objetos de valor, sin faltar, colgada en la pared, la figura en gran formato del Sagrado Corazón de Jesús en el área social, como imagen protectora del hogar y la familia. La exposición se recorre con lentitud y en silencio para no romper la quietud que la habita y al mismo tiempo se reviven viejos recuerdos infantiles construidos con las inolvidables visitas familiares a las casas de tías y abuelas.

Regreso al recibidor, veo al guardia sentado en su lugar, en silencio, y él acudiendo al lenguaje corporal levanta al unísono ambos hombros como valor entendido para comunicar que todavía no ha llegado nadie más al evento anunciado. Me percato por el vano sin puerta frente a mí que, en el ala opuesta al recibidor, al poniente, en la pieza que da a la calle y a la plaza, hay otra exposición con el atractivo título de “Cuando tengas tu casa”, mismo que me jala impulsado por la curiosidad.

Paola Livas, alumna egresada de la Facultad de Artes Visuales, es la autora de la exposición “Cuando tengas tu casa”, y en ella utiliza la técnica de la instalación interactiva como recurso de construcción de su obra, es decir, congrega en tiempo y espacio real objetos y cosas que organiza deliberadamente para construir el tema a tratar e invita al espectador a entrar en el campo de la composición y ser o formar parte de ella. Como hilo conductor nos advierte, en un escrito en la pared interior, que la frase familiar de uso común y reiterado la asume desde la empatía, es decir, comprender las emociones ajenas sin descartar las propias y advierte su sentido cercano a “ponte en mi lugar” –cuando tengas tus hijos y la carga del trabajo doméstico–, y nos advierte no confundirla con la otra frase semejante y cargada de amenazas: “mientras vivas en esta casa”.

El “cuarto redondo” lo divide con muro ciego de tabla roca y por puerta una cortina blanca de manta de algodón crudo, en dos secciones: la pública o social –sala– y la privada o íntima –recámara–; en la primera sección penden al centro del espacio tres aros sobrepuestos, separados verticalmente entre sí por cuerdas, a manera de tendedero; de los aros cuelgan a la vez telas de limpieza doméstica usadas y sucias e invita al espectador a que agregue otras telas al tendedero –disponibles sobre un cubo adjunto– escribiendo, en anonimato o no, una denuncia en ellas sobre el trabajo doméstico femenino como condena y maltrato; a esta parte la llama “La ropa sucia se lava en casa”. La sección privada al fondo la titula “Habitación propia”, compuesta por una celda reducida a manera de recámara

y en ella una cama individual tendida con una sábana blanca y una letanía bordada a mano en el extremo de la cabecera, “Una mujer debe seguir teniendo dinero y una habitación propia para seguir siendo artista”; se complementa el menaje de la celda con una pequeña mesa con silla en función de escritorio y sobre la cubierta hojas blancas de papel y una pluma, pieza que, por instrucciones previas de la autora, sólo debe ser usada por una persona a la vez, y en dicha soledad, propicia para la reflexión, sobre las hojas de papel, si así se desea, dejar por escrito una opinión al respecto.

Inevitablemente reaparecieron en mi recuerdo Nancy Peniche, Miriam de León, Saskia Juárez, Marilú Treviño, Rosa María Gutiérrez, Alejandra Rangel, Annie Blase, en su doble papel de mamás y productoras intelectuales. También pensé, particularmente, en María Eugenia Llamas, por aquella ocasión que grabamos un programa para televisión en una casona del Barrio Antiguo en Monterrey, en el que le cuestioné sin saber por qué y parafraseando el dicho más abundante en nuestra habla diaria “Ésta es tu casa” le dije, “Si mi casa es tu casa y la tuya es la mía, entonces, tu y yo... qué somos”. Escribí ese pensamiento en la cuartilla, salí de la instalación, dejando de ser parte de ella, y me incorporé en el salón central lleno de voces al evento al que había sido invitado, en el cual dominó la presencia fantasmal de otra *ama de casa*, Mónica Rodríguez, cofundadora –por su dote matrimonial– de la hacienda que dio pie a la casa-pueblo de San Pedro.



Terminado el evento –con firma del manifiesto y foto de grupo en las escaleras del kiosco– y ya camino de regreso a casa, seguí pensando y explorando las mil y una historias que se generan en el objeto cultural que todavía llamamos casa, la casa familiar y las de tías y abuelas, al porqué insistente del dicho *mi casa es tu casa* y a sus extensiones cuando la adjetivamos como en Casa de Dios, Casa del Ayuntamiento, Casa de la Cultura, Casa de peregrinos, Casa de migrantes, entre tantas más.

Si es cierta la vigencia del dicho cotidiano “mi casa es tu casa”, como lo es, entonces cabe la reflexión sobre la casa individual, la familiar, la común y como colofón lo de nosotros qué somos.



# Extractivismo, una actividad que atenta contra la sustentabilidad

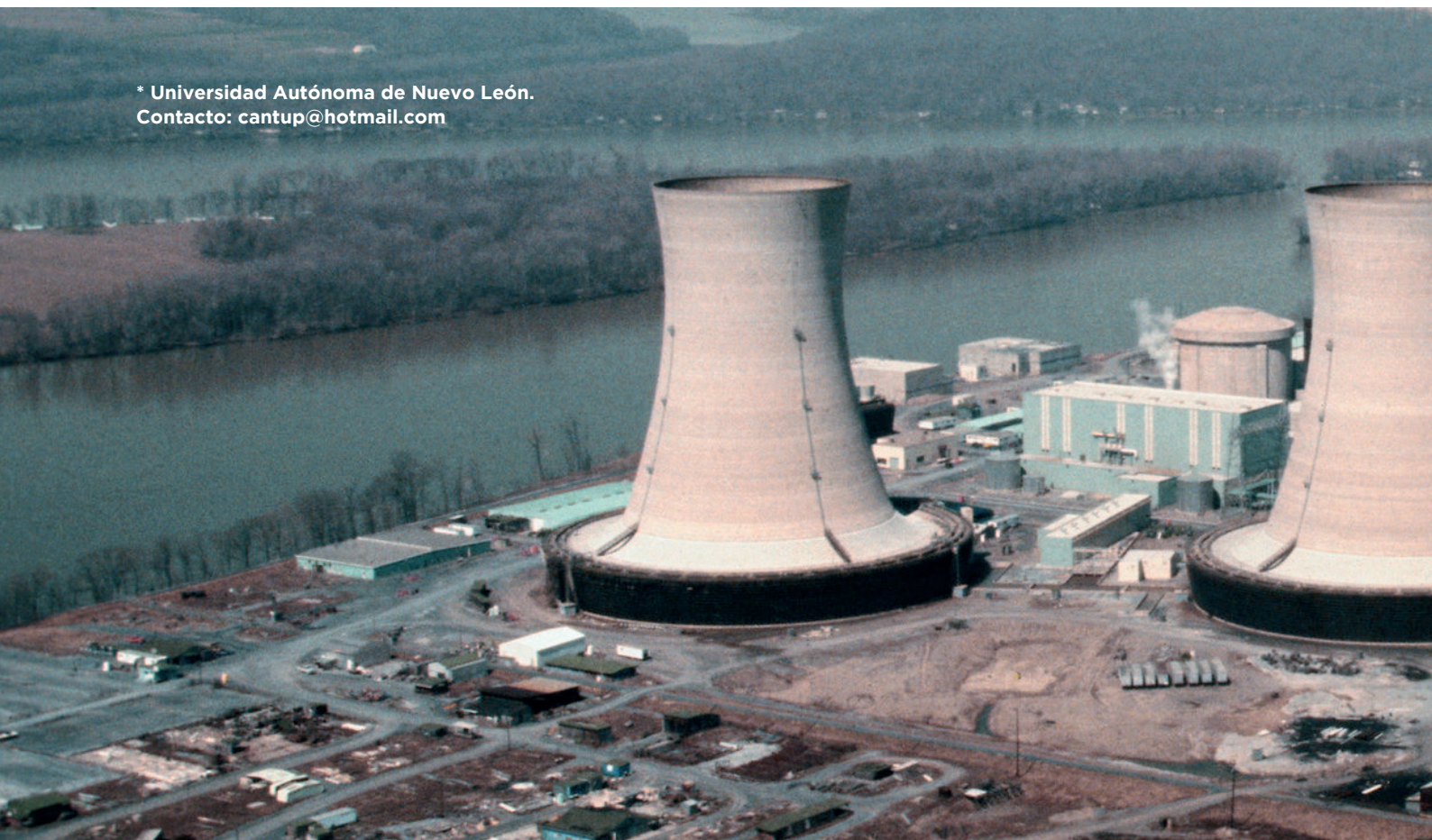
Pedro César Cantú-Martínez\*

El beneficio que aporta el capital natural al ser humano es descomunal, sin embargo, se ha observado que existe una tendencia que durante el siglo XX fue realizada por el modelo de desarrollo hegemónico de carácter capitalista, donde los emprendimientos industriales, ocultos bajo el lema de la responsabilidad social em-

presarial y del cumplimiento de los aspectos legales y de licenciamiento, les ha permitido mercantilizar un gran volumen de recursos naturales, y en la que Wagner y Pinto (2013) señalan, además, que algunas autoridades facilitan o colaboran para que se suceda esto.

70

\* Universidad Autónoma de Nuevo León.  
Contacto: [cantup@hotmail.com](mailto:cantup@hotmail.com)



Este aprovechamiento se muestra mediante “concesiones de proyectos extractivos a empresas transnacionales, las cuales, a través de la inversión extranjera directa (IED), afianzan una mecánica de aprovechamiento y explotación ambiental” (Azamar-Alonso y Carrillo-González, 2017, p. 401). Con lo cual, adicionalmente nos muestra una privatización del patrimonio natural que es impuesta desde el exterior, solventada desde las propias autoridades gubernamentales y apoyada por grupos sociales empoderados.

Esto es de suma relevancia, a la luz del juicio realizado por el académico hindú Ashis Nandy (2015, p. 1), al indicar lacónicamente que

**no hay ninguna catástrofe medioambiental para la cual no haya un grupo de influencia –elites políticas, científicas o económicas– que esgrima el argumento del progreso para absolver a los responsables de las destrucciones que han causado. Desde Three Mile Island hasta [...] Fukushima [...] se repite la misma historia. El progreso no es ya una idea inocente. Ahora es una ideología por la que la gente está dispuesta a matar y a morir.**

Es así que Bolados (2016) comenta que, en la actualidad, tanto los apremios de orden social como los ambientales, se han erigido mediante la agenda pública y el ejercicio de la intimidación de las personas, en donde se deja vislumbrar una serie de disputas políticas conforme a los procedimientos de adjudicación de los bienes comunitarios, de orden regional o nacional, que son gestionados a la iniciativa privada sin la participación social.

Por lo tanto, en el presente manuscrito abordaremos qué es el extractivismo, sus impactos y algunos casos al respecto que atentan contra la sustentabilidad, pero particularmente contra la autodeterminación de las sociedades, para finalmente hacer unas consideraciones finales.







# ¿QUÉ ES EL EXTRACTIVISMO?

Eduardo Galeano (2004, p. 16) comenta, en *Las Venas Abiertas de América Latina*, que desde

**el descubrimiento hasta nuestros días, todo se ha trasmutado siempre en capital europeo o, más tarde, norteamericano, y como tal se ha acumulado y se acumula en los lejanos centros de poder. Todo: la tierra, sus frutos y sus profundidades ricas en minerales, los hombres y su capacidad de trabajo y de consumo, los recursos naturales y los recursos humanos.**

Partiendo de este pronunciamiento, podemos advertir el extractivismo mediante la actividad intensa de explotación de recursos naturales en grandiosos volúmenes, cuya finalidad es exportarlos para alimentar y sostener un mercado de orden internacional, muy alejado del lugar de origen y cuyos beneficios no son evidentes para la sociedad que los provee (Luque, Herrero-García y Peñaherrera, 2018). De esta manera, Gudynas (2013, p. 2), comenta que “los usos más conocidos de este término están estrechamente asociados a dos tipos de actividades: la explotación minera y petrolera, y un destino específico: su exportación”, pero también podemos incluir la agricultura intensiva de monocultivos o de la actividad pecuaria con fines de exportación.

Por lo tanto, Gudynas (2013, p. 2), además, opina que esta subtracción de recursos naturales

**puede ser directa, donde hay una apropiación de recursos en ambientes naturales o poco modificados, los que serán utilizados directamente por los humanos (por ejemplo, talar árboles para obtener madera), o puede ser indirecta, donde primero se transforma la naturaleza, y a partir de allí se pueden obtener los recursos a ser consumidos (es el caso de convertir un bosque en tierras de cultivos, para luego cosechar granos).**

Sobresale que esta actividad extractivista no diferencia entre recursos naturales no renovables o renovables, por lo que presenta un modelo totalmente perjudicial y que está en constante expansión. Además, según Azamar-Alonso y Carrillo-González (2017, p. 406), la presencia de

**proyectos extractivos en regiones subdesarrolladas también obedece a la alta demanda internacional de bienes primarios de los países emergentes y de las naciones desarrolladas, dicha demanda depende de la violencia económica ejercida en contra de las naciones subdesarrolladas, misma que se da en forma de excesivos niveles de interés en la deuda contraída, o por medio de condiciones abusivas para acceder a préstamos.**

Por lo cual, el extractivismo impulsa y circunscribe el desplazamiento de enormes montos de recursos naturales, con ningún

proceso que medie de carácter productivo, ya que su propósito es ser enviados a otros lugares del mundo para su tratamiento industrial. Como es evidente, el extractivismo promueve una desindustrialización en las naciones que proveen estas materias primas, y a las cuales vuelven los productos procesados para su consumo a un precio más exorbitante. De esta manera, el extractivismo conlleva implícitamente un modelo que es insostenible tanto ambiental como socioeconómicamente.

Actualmente, se reconocen dos tipos de extractivismo: uno que es denominado convencional, y otro que es nombrado como neoextractivismo. El convencional tiene por propósito, de acuerdo con Portillo (2014, p. 15), “alcanzar altas tasas de crecimiento económico a través del estímulo de las exportaciones. En este marco, la IED en sectores como la minería y los hidrocarburos resulta fundamental”. Mientras el neoextractivismo, señala este mismo autor, se caracteriza por un “auge fuerte y prolongado en los precios de las materias primas, particularmente mineras e hidrocarbúricas; tasas de crecimiento económico relativamente altas y, por último, surgimiento de movimientos políticos de carácter progresista” (p. 17).

# IMPACTOS DEL EXTRACTIVISMO

Por lo antes mencionado, Gudynas (2014, p. 79) comenta que en las últimas décadas “los conflictos frente a actividades extractivas han cobrado enorme importancia. Se han extendido a muchos países, en varios de ellos han aumentado su intensidad, y logran articular diversas temáticas, tanto sociales como ambientales”. Esto es supeditado particularmente, según Carvajal (2016, p. 9), a la parcelación que subsiste en el ámbito del trabajo donde

**asigna a unos países el rol de importadores de materias primas para ser procesadas y a otros el de exportadores; esta división es funcional exclusivamente al crecimiento económico de los primeros, sin ningún reparo en la sustentabilidad de los proyectos, ni el deterioro ambiental y social gene-**

**rado en los países productores de materias primas.**

Por ejemplo, en el caso de la minería, para lograr obtener tres kilogramos de cobre es necesario remover y procesar 1,000 kilogramos de suelo; de igual manera, para la obtención de un kilogramo de oro se requieren 540,000 kilogramos de superficie terrestre, según el Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales (OLCA, 2019a). De estas últimas circunstancias nace el hecho de que se generen

**grandes volúmenes de residuos, en parte desechos rocosos mineralizados con metales diferentes al oro que generalmente se relacionan con la acidificación de aguas y la consiguiente liberación de especies químicas tóxicas que**

**acompañan al oro (en particular metales pesados), y en parte las denominadas colas o relaves consistentes de lodos altamente contaminados con químicos adicionales en los procesos de beneficio de oro, además de acompañantes de oro que también son liberados a las aguas, en este caso muy alcalinas (Cabrera y Fierro, 2013, p. 91).**

Esto deja como consecuencia un pasivo ambiental en las enormes cantidades de suelo perturbadas, así como en la cantidad considerable de agua y energía que emplean para sus procesos. En lo relativo al empleo de agua, Cabrera y Fierro (2013) comentan que para producir un gramo de oro se consumen entre 450 a 1060 litros de agua, y para tener un punto de comparación, tan sólo para producir un gramo de maíz se demanda



entre 0.8 a 2.5 litros de agua. Además, también generan una proporción enorme de residuos peligrosos que son emanados por sus actividades, de tal manera que, para reunir un kilogramo de plata se demanda usar 2.1 kilogramos de mercurio (Castro, 2013). Por consecuencia, deja un problema ambiental y una deuda ecológica que recaerá en el país de donde se substraen los recursos naturales.

Adicionalmente, se generan impactos tanto sociales como económicos, que se muestran en la desigualdad entre las personas cercanas al emprendimiento, que motiva que otras fuentes locales de carácter laboral se deterioren o bien se disuelvan, como las actividades agropecuarias a menor escala. Lo anteriormente genera un desplazamiento obligado de las personas oriundas del lugar, y en muchos casos claudican las formas culturales de vida existentes en los sitios intervenidos (OLCA, 2019a).

En este contexto, Luque, Herro-García y Peñaherrera (2018, p.131), comentan que la

**externalización de riesgos (químicos, radioactivos, medioambientales, etc.) producidos por las actividades del extractivismo, no puede estar subcontratada hacia países más pobres, sin recursos, en muchos casos con altos índices de corrupción o Estados fallidos a la sombra de gobiernos ávidos de inversión, sin legislación nacional confiable y con ausencia de un organismo internacional que vele por ello.**



# CASOS DE EXTRACTIVISMO

El OLCA (2019b) es una organización no gubernamental que da seguimiento y denuncia a los conflictos sociales y ambientales en la que incurren muchas comunidades en total desventaja frente a los modelos empresariales que atentan contra sus territorios y que inciden en un extractivismo devastador. Este observatorio cuenta con abundantes casos documentados y de donde retomamos algunos hechos.

## Caso 1. Celulosa Arauco.

**Situación:** modernización y ampliación de la planta. Pretende triplicar la producción de celulosa llegando a producir 2.1 millones de toneladas anuales.

**Conflicto:** amenaza con intervenir aún más los ecosistemas y el territorio ancestral lavquenche, ubicado entre el mar y la cordillera de Nahuelbuta, en la provincia de Arauco.

**País:** Chile.

## Caso 2. Minería en Chiapas.

**Situación:** operación de 111 mineras autorizadas en Chiapas, para extracción de oro, plata, titanio y barita.

**Conflicto:** se han detenido por ahora estos permisos mediante la organización de las comunas ante el eminente hecho de la destrucción de los bosques y la contaminación que estas actividades generarían.

**País:** México.

## Caso 3. Hidroeléctrica Ituango

**Situación:** represamiento del río Cauca por empresas públicas de Medellín.



**Conflicto:** quebranta el tejido social de pobladores desplazados (desde la década de 1990) y quienes ahora son desalojados por la megaindustria. Los lugareños –barreros y pescadores– no pueden acceder al río a realizar sus actividades para el sustento diario.

**País:** Colombia.

## Caso 4. Soja dicamba o DTRR2

**Situación:** empleo de dicamba para eliminar malezas resistentes al glifosato en los campos agrícolas de soja.

**Conflicto:** Monsanto viene llevando adelante el trámite para la aprobación de su nueva semilla transgénica de soja resistente al dicamba y al glifosato, soja dicamba o DTRR2, lo que incentivaría uso intensivo del herbicida dicamba, que es más persistente en su acción y puede causar daños a otros cultivos y personas.

**País:** Paraguay.

## Caso 5. Proyecto minero Llurimagua-Codelco

**Situación:** no tratar el agua o lodos producto de las perforaciones, antes de lanzarlas al ambiente; de talar árboles de más de 10 cm de diámetro, de crear riesgo de erosión del suelo al botar aguas contaminadas en pleno bosque.

**Conflicto:** denuncia por las comunidades de Junin y Chalguyacu Alto por la contaminación del río Junin y deterioro ambiental del sistema natural.

**País:** Ecuador.

## CONCLUSIONES

Sin lugar a dudas, los megaproyectos de extractivismo han producido diversos impactos socioambientales negativos, que se han hecho manifiestos en primera instancia por una disputa territorial y acceso a diversos recursos naturales por las comunidades afectadas. Además, estos emprendimientos han propiciado un deterioro ambiental y social de manera paulatina, que a nivel local y regional cambia las dinámicas territoriales y afecta la calidad de vida.

En estos escenarios se observa un progreso que ha caracterizado a la modernidad y posmodernidad, cuyo avance se sustenta en los logros tecnocientíficos, se nutre ávidamente de las riquezas que ofrece el patrimonio natural y genera una asimetría social considerable. De donde se colige que los marcos legales y evaluaciones ambientales continúan siendo lamentablemente endeblados, vulnerables o improcedentes para afrontar aquellos proyectos que conllevan un enorme impacto social y ambiental de manera negativa.

Esto es de suma importancia si consideramos que aún con el marco de referencia internacional del desarrollo sustentable, algunos sectores sociales, como gobiernos progresistas, siguen impulsando el extractivismo, al considerarlo indispensable para impulsar el ascenso de sus naciones, no obstante las condiciones desfavorables que promueve esta actividad.

## REFERENCIAS

Azamar-Alonso, A., y Carrillo-González, G. (2017). Extractivismo y deuda ecológica en América Latina. *Revista Luna Azul*. 45 (julio-diciembre): 400-418.

Bolados, P. (2016). Conflictos socioambientales/territoriales y el surgimiento de identidades postneoliberales (Valparaíso-Chile). *Izquierdas*. 31: 102-129.

Cabrera, M., y Fierro, J. (2013). Implicaciones ambientales y sociales del modelo extractivista en Colombia. En: L.J. Garay (Dir.) *Minería en Colombia. Fundamentos para superar el modelo extractivista*. (pp. 89-124). Colombia. Contraloría General de la República de Colombia.

Carvajal, L.M. (2016). *Extractivismo en América Latina. Impacto en la vida de las mujeres y propuestas de defensa del territorio*. Bogotá. Fondo Acción Urgente-América Latina.

Castro, J. (2013). *Evaluación de los suministros de mercurio primario y secundario en México*. México. Comisión para la Cooperación Ambiental.

Galeano, E. (2004). *Las venas abiertas de América Latina*. Buenos Aires. Siglo Veintiuno Argentina.

Gudynas, E. (2013). Extracciones, extractivismos y extrahecciones. Un marco conceptual sobre la apropiación de recursos naturales. *Observatorio del Desarrollo*. 18(febrero): 1-18.

Gudynas, E. (2014). Conflictos y extractivismos: conceptos, contenidos y dinámicas. *DECURSOS Revista en Ciencias Sociales*. 27-28: 79-115.

Luque, A., Herrero-García, N., y Peñaherrera, J. (2018). Extractivismo en América Latina: ¿Bien común o democracia delegativa? *M+A. Revista Electrónica@ de Medio Ambiente*. 19(1): 121-137.

Nandy, A. (2015). Un silencio muy largo. *Le Monde Diplomatique en Español*. Disponible en: <https://mondiplo.com/un-silencio-muy-largo>.

Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales (OLCA) (2019a). *Frenar el extractivismo...cuestión de vida o muerte*. Chile. OLCA y Fundación Rosa Luxemburgo. Disponible en: <http://olca.cl/oca/informes/Frenar-el-extractivismo--cuestion-de-vida-o-muerte.pdf>

Observatorio Latinoamericano de Conflictos Ambientales (OLCA) (2019b). *Comunidades en acción/Más informaciones*. Fecha de Consulta: 19 junio 2019. Disponible en: <http://olca.cl/oca/index.htm>

Portillo, L.H. (2014). Extractivismo clásico y neoextractivismo, ¿dos tipos de extractivismos diferentes? I Parte. *Tendencias*. 15(2): 11-29.

Wagner, L.S., y Pinto, L.H. (2013). Ambientalismo(s) y bienes naturales: desafíos al extractivismo en Argentina y Brasil. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*. 14: 69-94.



## Carro inteligente para supermercados



78

¿Alguna vez has visto a una persona con muletas batallar en el supermercado? ¿O alguien te ha pedido que le indiques si el producto que lleva es el que tiene apuntado en su lista? A éstos y otros problemas se enfrentan las personas con movilidad reducida (ya sea que vayan en muletas o silla de ruedas) o debilidad visual cuando se trata de efectuar las compras de la despensa. Pero déjame decirte que esto está por terminar, pues investigadores de la Universidad de Salamanca (España) han desarrollado un carrito revolucionario que facilitará la adquisición de productos en los supermercados, sobre todo a las personas con movilidad reducida. El carro será capaz de seguir al usuario por todos los pasillos, contabilizar los productos incorporados y hasta ofrecer información y consejos sobre nutrición.

“El objetivo principal es el diseño y la construcción de un carro autónomo capaz de seguir la trayectoria de una persona dentro de un supermercado”, explica Gabriel Villarrubia González, investigador del Departamento de Informática y Automática de la institución académica salmantina. Para ello, la persona sólo tiene que levantar los brazos y el sistema de reconocimiento visual se sincroniza. Si se trata de personas que no pueden realizar este movimiento por llevar muletas o ir en silla de ruedas, la sincronización también se puede realizar mediante comandos de voz.

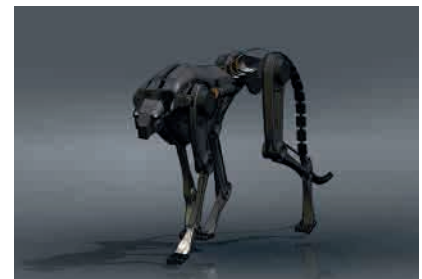
A través de una aplicación móvil, el cliente hace su lista en casa. Una vez que llega al supermercado, la información pasa al carro de la compra elegido y el sistema va identificando los productos adquiridos. Además, no sólo los contabiliza y los tacha de la lista, sino que informa al usuario el importe acumulado en tiempo real.

Además, “dado que el etiquetado de los productos presenta dificultades para las personas mayores o con problemas visuales, el carro es capaz de detectar cuál es el alimento que se ha escogido y reproduce, por ejemplo, los ingredientes o la composición química”, comenta el investigador. Esto es especialmente importante en el caso de las intolerancias alimentarias. Asimismo, la experiencia se enriquece aún más porque, si el cliente lo desea, el sistema puede informar de posibles recetas en función de los alimentos que se incorporen.

“La principal tecnología utilizada en el proyecto es el reconocimiento de imágenes, que se usa para identificar al usuario y así acompañarle por todo el supermercado. También incorporamos sensores RFID, que se emplean para la identificación de los productos. Finalmente, otra tecnología importante es el Bluetooth, mediante la cual los carritos se pueden guiar por los pasillos”, apunta André Salas, investigador implicado en el proyecto.

La implementación del sistema en un supermercado convencional es sencilla y ofrece muchas ventajas no sólo a los clientes, sino también a los gestores de estos negocios. Sin duda se trata de un gran avance que ayudará mucho a las personas a quienes va dirigido, aunque, aquí entre nos, yo creo que a más de uno nos gustaría poderlo usar (fuente: FGUSAL/DICYT).

## Un robot guepardo que “corre” a ciegas por terrenos complejos



De niño siempre soñé con tener un carrito a control remoto que hiciera piruetas, y que pudiera utilizarlo en el campo, sobre todo en lugares rocosos y llenos de obstáculos. Pues el robot que te voy a presentar no es un auto, es un animal, llamado *Cheetah 3* y es capaz de correr y saltar sobre terreno accidentado, así como de recuperar rápidamente su equilibrio cuando es empujado de manera súbita, todo ello siendo esencialmente ciego.

Este “juguetito” pesa unos 40 kilogramos, es del tamaño de un perro labrador adulto y ha sido diseñado intencionadamente para que haga todo esto sin depender de cámaras o de cualquier otro sensor parecido del entorno. En su lugar, “nota” al momento las características del terreno por el que avanza basándose en la percepción táctil instantánea de cada trozo de terreno con el que entra en contacto físico al pisarlo, y en el rápido procesamiento de la información obtenida de este modo.

El principal diseñador de *Cheetah 3*, el robotista Sangbae Kim del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en Cambridge, Estados Unidos, pronostica que en el plazo de unos pocos años, este modelo de robot estará listo para pasar del laboratorio a las misiones reales, que en su mayor parte serán demasiado peligrosas para enviar personas a realizarlas, o en sitios de acceso muy difícil para humanos, como en zonas de desastres naturales (fuente: Amazings/NCYT).

## Revolucionan la seguridad de Internet



Algunas personas poseen un token de banco que genera contraseñas aleatorias para poder llevar a cabo sus movimientos o pagos en línea, esto dificulta que alguien más pueda hacer uso de esa cuenta. Te imaginas que esto se pudiera llevar a cabo en nuestra cuenta de Facebook donde a más de uno se nos ha olvidado la contraseña. Pues déjame decirte que las comunicaciones electrónicas se harán seguras con la creación del primer generador de números aleatorios Quantum práctico del mundo, patentado por Quantum Base, una empresa *spin-out* de la Lancaster University. Los QRNG actuales suelen ser lentos y costosos, por lo que sólo se utilizan en aplicaciones de nicho, como en los bancos.

Pero el Quantum Base QRNG puede integrarse dentro de cualquier dispositivo electrónico sin aumentar el costo o la complejidad y con una velocidad máxima muy alta. El impacto del QRNG será revolucionario, haciendo que los ataques basados en predecir eventos “aleatorios” sean cosa del pasado.

Con un milésimo del ancho de un cabello humano, este dispositivo cuántico se puede incorporar tanto a la microelectrónica nueva como a la existente. Utiliza un solo diodo que puede, por ejemplo, fabricarse junto con los otros miles de millones de diodos en un microprocesador. Resolverá las debilidades del cifrado actual, permitirá que Blockchain se implemente con una seguridad cuántica irrompible y será vital en áreas sensibles como la banca, las finanzas, la defensa y las redes sociales.

Los números aleatorios son la base de la seguridad y la privacidad de cualquier comunicación electrónica. Desde loterías y juegos de azar hasta algoritmos de encriptación en cada mensaje enviado a través de Internet, se requiere una fuente confiable de números aleatorios. Pero la verdadera aleatoriedad no es fácil de lograr, y las soluciones actuales pueden conducir a resultados predecibles, como en el caso de algoritmos matemáticos mal diseñados, o pueden ser parciales si dependen de dispositivos físicos.

La seguridad en línea actualmente se basa en generadores de números aleatorios “pseudo” que son vulnerables al ataque. El profesor Rob Young, director del Quantum Technology Center de Lancaster, dijo: “la tecnología que hemos creado aquí es emocionante no sólo porque resuelve un problema importante, sino que también representa la mejor solución posible para ese problema. Defectos en el camino de los dispositivos electrónicos actuales al

producir números aleatorios debilita su seguridad y los hace menos eficientes. Nuestra solución corrige esto, pero también es increíblemente pequeña y eficiente, lo cual es muy importante” (fuente: U. Lancaster).

## Recubrimiento sin toxicidad para repeler el agua



Alguna vez trabajé para un taller de salas donde se ponía una especie de teflón a los sillones para que no se mojaran y se ensuciaran menos, pero siempre que lo aplicábamos nos dolía la cabeza y nos aparecían pequeñas ronchas en las manos, además de que olía bastante mal durante un par de días. De hecho, en los últimos años se ha comprobado que las sustancias con las que se elaboran bastantes recubrimientos convencionales para repeler el agua tienden a permanecer en el medio ambiente y pueden acumularse en nuestros cuerpos, de modo que es probable que sean retiradas gradualmente del mercado por razones de seguridad. Eso implica que van a necesitarse sustancias nuevas lo bastante seguras que sean capaces de reemplazar a las descartadas.

Al respecto, el equipo de Dan Soto, Kripa Varanasi y Karen Gleason, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en Cambridge, Estados Unidos, ha concebido una solución prometedora: un recubrimiento sin efectos tóxicos que no sólo añade capacidad hidrorrepelente a los tejidos naturales como el algodón y la seda, sino que también es más efectivo que los recubrimientos existentes.

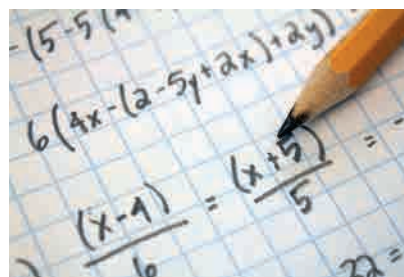
Usando un nuevo proceso de recubrimiento, que no requiere temperaturas altas, se obtiene una capa uniforme y delgada que sigue los contornos de las fibras y que no lleva a obturación alguna de los poros, eliminando así la necesidad de una segunda etapa de procesamiento para reabrirlos. Después, se puede añadir un paso adicional como proceso opcional para incrementar aún más la capacidad de repeler el agua.

El proceso funciona en muchos tipos diferentes de tejidos además de los citados, incluyendo, por ejemplo, nilón y lino, e incluso en materiales que no son tejidos textiles, como el papel, lo que abre un camino hacia toda una nueva gama de potenciales aplicaciones.

Los tejidos recubiertos del equipo de Soto, Varanasi y Gleason ya han sido sometidos a un montón de pruebas en el laboratorio, incluyendo un ensayo estándar de lluvia utilizado por la industria. Los materiales han sido bombardeados no sólo con agua, también con varios otros líquidos, incluyendo café, ketchup, hidróxido de sodio y varios ácidos y bases, y los han repelidos bien a todos. Los

materiales recubiertos también han sido sometidos a repetidos lavados sin que se haya detectado la degradación del recubrimiento, y también han pasado pruebas de abrasión, sin que estos hayan sufrido daños tras 10,000 repeticiones (fuente: Amazings/NCYT).

## Los asteroides y las matemáticas



Seguramente tú, como muchos de nosotros alguna vez, en clase de matemáticas, frente a algún problema complicado, o ante una tarea muy difícil, te preguntaste para qué sirven las matemáticas avanzadas si con las básicas era suficiente. Pues déjame decirte que, entre tantos usos, hay uno en especial que hoy te quiero platicar. Cada año, la Tierra se ve golpeada por toneladas de material proveniente del espacio. La mayoría de estos objetos son de pequeña dimensión y se destruyen al entrar en contacto con la atmósfera; los que logran traspasarla no son muy grandes y suelen caer en el océano, que cubre 70% de la superficie terrestre. Sin embargo, en el pasado, grandes asteroides impactaron con nuestro planeta, provocando catástrofes globales. Hoy en día, las agencias espaciales, como la estadounidense (NASA) y la europea (ESA), dedican programas a



la búsqueda de asteroides peligrosos con el principal objetivo de descubrir con suficiente antelación cuándo y dónde podrían impactar, para así poder tomar las medidas adecuadas.

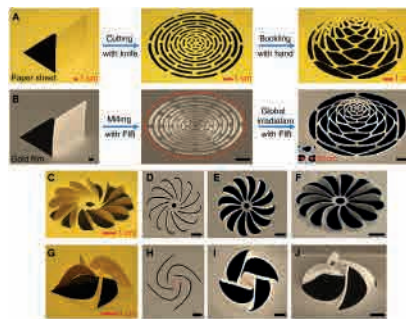
Se conocen aproximadamente unos 2,000 asteroides potencialmente peligrosos de los cuales 750 tiene una probabilidad no despreciable (aunque muy baja) de impactar. Para prever su evolución se emplean intrincados modelos matemáticos y estimaciones. Stefano Marò, investigador del Instituto de Ciencias Matemáticas (ICMAT, España), y Giovanni Federico Gronchi (Università di Pisa, Italia) han probado que algunas de las técnicas más empleadas son, efectivamente, una buena aproximación estadística a la evolución que podría describir el asteroide. Sus resultados se publicaron en la revista *SIAM Journal on Applied Dynamical Systems*.

“El movimiento de los asteroides viene descrito por complicadas ecuaciones diferenciales, que se resuelven mediante estimaciones numéricas. Los métodos empleados son muy precisos, pero, a la vez, requieren mucho tiempo de cálculo en sofisticados ordenadores”, señala Marò. Efectuar un estudio numérico para cada uno de los asteroides peligrosos requeriría demasiado tiempo, por lo que sólo se seleccionan los que merecen una atención particular, ya que tienen una probabilidad real de colisionar con la Tierra. Para ello, las matemáticas juegan un papel fundamental. “Por un lado, ofrecen modelos simplificados que aproxima bien la evolución real y cuya solución se puede calcular en un tiempo menor que en el caso general; por otro, tratan de encontrar

condiciones bajo las cuales el asteroide no puede impactar contra la Tierra, y poder, así, ser descartado”, explica Marò.

Hasta hace poco sólo se había probado para algunos casos. Ahora, Marò y Gronchi han extendido esta teoría a otros casos relevantes, teniendo en cuenta las diferencias sustanciales que presentan. En su artículo, los investigadores han probado que la solución aproximada está bien definida, existe y es única. Además, los experimentos numéricos sugieren que la solución generalizada es una buena aproximación, también en esta situación. Ahora el reto es demostrar formalmente que así es para, de esta manera, poder confiar plenamente en los modelos y en las predicciones que ofrecen (fuente: ICMAT/DICYT).

## Kirigami “luminoso”



Tal vez has oído hablar del kirigami y del origami, es más, tal vez hasta hayas visto la película de *Kubo y la búsqueda del samurái* (*Kubo and the Two Strings*) donde un niño hace figuras de origami al ritmo de las cuerdas de su *shamisen*. Pues bien, el kirigami, así como el

origami (o papiroflexia), son artes que han servido tradicionalmente para confeccionar complejas figuras de papel sin más acciones que las de plegarlo o recortarlo. El origami ha vivido en años recientes un renacimiento en el marco de las nuevas tecnologías y parece que ahora comienza a suceder lo mismo con el kirigami.

De hecho, el nanokirigami ha despegado como un prometedor campo de investigación, aplicado a materiales planos en la escala nanométrica, que se mide en milmillonésimas de metro. Ahora, el equipo internacional de Nicholas X. Fang, del Instituto Tecnológico de Massachusetts (MIT), en Estados Unidos, ha aplicado por vez primera esta estrategia a la creación de nanodispositivos para manipular luz, abriendo nuevas posibilidades para la investigación y, en algún momento futuro, quizás incluso llevando a la creación de nuevos métodos de comunicación, sistemas de detección o dispositivos de computación, todo ello basado en la luz.

Usando procesos apoyados en tecnología de fabricación estándar de microchips, Fang y sus colegas utilizaron un haz de iones enfocado para producir un patrón preciso de orificios o rendijas en una lámina metálica de apenas unas pocas decenas de nanómetros de grosor. El proceso hace que la lámina se doble y se retuerza adoptando una forma compleja tridimensional capaz de filtrar de manera selectiva luz con una polarización particular.

Los intentos previos de crear dispositivos funcionales basados en

el kirigami se han servido de métodos de fabricación más complicados que requieren diversos pasos de plegado y han estado orientados principalmente a aplicaciones mecánicas en vez de ópticas. Los nuevos nanodispositivos, en cambio, pueden formarse en un único paso de plegado y podrían ser utilizados para llevar a cabo una amplia gama de funciones ópticas (fuente: DICYT).

## ¿Convertir calor en electricidad?



Cuando ponemos a tostar un pan en nuestra tostadora sucede algo muy interesante: la electricidad se convierte en calor; según los expertos, esto es fácil. Lo opuesto, convertir calor en energía eléctrica, resulta mucho más difícil, una lástima porque se estima que aproximadamente 70 por ciento de toda la energía en el mundo se desperdicia en forma de calor. Cada máquina y dispositivo en nuestra vida, desde el automóvil hasta el ordenador, suelen calentarse cuando funcionan, y desperdician mucha energía a través de la pérdida de ese calor que generan.

Aunque hay dispositivos capaces de convertir el calor en electricidad, todavía no han alcanzado un nivel de optimización lo bastante bueno como para que se puedan implantar

de forma generalizada. Entre sus limitaciones destacan su alto coste, su tendencia a ser voluminosos, y el hecho de que típicamente sólo pueden aprovechar el calor de fuentes a muy altas temperaturas.

Es imperativo, por tanto, explorar nuevos enfoques de diseño. Uno que podría depararnos muchas sorpresas agradables en un futuro quizá no muy lejano es el adoptado en una prometedora línea de investigación a cargo del equipo de Paul Davids y Joshua Shank, de los Laboratorios Nacionales de Sandia en Estados Unidos.

Davids, Shank y sus colegas han desarrollado un diminuto dispositivo basado en silicio que puede aprovechar el calor residual y convertirlo en corriente eléctrica continua. Este aparato está hecho de materiales comunes, como aluminio, silicio y dióxido de silicio, aunque combinados de formas muy poco habituales. Destaca también por su minúsculo tamaño: ¡es más pequeño que la uña del dedo meñique!

Su parte superior es de aluminio grabado con franjas unas 20 veces más pequeñas que el grosor de un cabello humano. Este patrón, aunque demasiado pequeño para ser visto a simple vista, sirve como una especie de antena para capturar la radiación infrarroja.

Entre la parte superior de aluminio y la inferior de silicio se halla una capa muy delgada de dióxido de silicio. Esta capa tiene unos 20 átomos de silicio de grosor, o sea que es 16,000 veces más delgada que un cabello humano. Las antenas grabadas y estampadas

de aluminio canalizan la radiación infrarroja hacia esta capa delgada.

La radiación infrarroja atrapada en el dióxido de silicio crea oscilaciones eléctricas muy rápidas, de unos 50 billones por segundo. Esto empuja a los electrones atrás y adelante entre el aluminio y el silicio de una forma asimétrica. Este proceso genera corriente eléctrica continua neta. Dado que el equipo ha construido el dispositivo con los mismos procesos usados por la industria de circuitos integrados, se podrá fabricar fácilmente a gran escala (fuente: DICYT).

## Diseño urbanístico vs. lluvia torrencial



¿Alguna vez te ha tocado ver en las noticias cuando una tromba azota una ciudad?, las imágenes son impactantes, sobre todo cuando vemos cómo cubre autos y se introduce en las casas, dañando todos los muebles. Una lluvia suave suele resultar beneficiosa porque tiene pocas probabilidades de causar daños y porque es más fácil aprovechar el agua así descargada que cuando la lluvia es fuerte. En este último caso, el agua tiene más probabilidades de ocasionar estragos, sobre todo si en lugar de ser absorbida por el terreno se

acumula en superficies, esto último es muy común en áreas urbanas.

Las inundaciones por tormentas en ciudades se ven agravadas por la infraestructura urbana, dado que muchos de los ecosistemas naturales que absorberían la lluvia se han visto sustituidos por pavimento, lo que limita grandemente la capacidad de filtración de un área. Esto mantiene el agua de la lluvia en la superficie, donde recoge todo tipo de contaminantes (basura, metales pesados, sustancias químicas industriales) que son al final transportados hacia cuerpos de agua cercanos, incluyendo a menudo los empleados para el suministro local de agua potable.

Muchas ciudades no poseen sistemas adecuados para gestionar la escorrentía del agua de lluvia copiosa, y esto provoca problemas cuando llueve mucho en poco tiempo. Las plantas de tratamiento del agua de lluvia son caras y hay que integrarlas en los sistemas de tratamiento de aguas y alcantarillado existentes. Sin espacios ni procesos que puedan atrapar y purificar el agua contaminada antes de que vuelva a circular o pase al entorno natural, las zonas urbanas pierden agua potable que de otro modo podría estar disponible para consumo humano e incluso para reabastecer del preciado líquido a la capa freática.

Dotar a las ciudades de sistemas naturales de gestión del agua de lluvia (acondicionar en ellas espacios verdes) es una opción cada vez más popular, en parte debido a que dichos sistemas son posibles. Un equipo interdisciplinario de ingenieros y planificadores urbanísticos del Instituto

Tecnológico de Massachusetts (MIT), en Cambridge, Estados Unidos, ha desarrollado ahora un sistema avanzado de este tipo, que se vale de humedales y estanques para lograr una gestión eficiente del agua de lluvia (incluyendo limpiarla) y aportar además beneficios recreativos y ecológicos.

Los humedales y estanques del diseño urbanístico elaborado por el equipo de Alan M. Berger, Celina Balderas Guzmán y David L. Sedlak, están pensados para resultar mucho más efectivos que los diseños existentes a la hora de controlar la circulación del agua y purificar el agua de lluvia, proporcionando al mismo tiempo los citados beneficios recreativos y para los ecosistemas.

El nuevo diseño combina ingeniería, planificación urbanística y arquitectura para obtener un espacio verde versátil. Además de gestionar el agua de lluvia, el humedal o estanque crea verdor para la ciudad, espacio recreativo para la comunidad y hábitats valiosos para la vida silvestre.

El diseño, a modo de conjunto de islas agrupadas, es modular y adaptable a escalas mayores, de manera que puede ser ajustado para que encaje en las necesidades y recursos de las diversas configuraciones urbanas. El trabajo de investigación se ha centrado inicialmente en dos casos específicos: la ciudad de Houston y la de Los Ángeles, ambas en Estados Unidos (fuente: DICYT).

## Plancha de cocina eficiente



A quién no le ha tocado ver en la calle un puestecito de tacos donde el señor o la señora que atienden les da vuelta a las tortillas de harina o maíz en una especie de comal o plancha incrustada en la estructura del “carrito taquero”. Se les antojaron los tacos (niéguenmelo). Pues bien, en la búsqueda de soluciones novedosas a problemáticas del día a día, el Departamento de Ciencias Energéticas y Fluídicas (El Salvador) desarrolla estudios sobre temas con impacto social. En esa línea, entre 2016 y 2017 se llevó a cabo la investigación ‘Fortalecimiento de la capacidad técnica y científica en el área energética de la industria metal-mecánica especializada en la fabricación de cocinas de plancha’.

“Pensamos en la cocina de plancha porque en El Salvador se utiliza mucho; su construcción siempre ha sido artesanal, con criterios empíricos, y representaba una oportunidad de hacer un producto mejorado que pusiera en menos riesgo a los usuarios”, explica Mario Chávez.

De acuerdo con el docente del Departamento e investigador principal, ésta se planteó entre sus objetivos diseñar una cocina de

plancha que incorporara criterios térmicos y mecánicos mediante un proceso de fabricación optimizado. El modelo se probó en tres tortillerías y pupuserías, donde se comparó su desempeño en cuanto a consumo de gas con un modelo de plancha comercial.

Aarón Martínez, jefe del Departamento, explica que la plancha de gas eficiente, como también la llaman, logra un ahorro de gas de hasta un 53 por ciento en comparación con las planchas tradicionales. Además, afirma, “reduce la temperatura de la estructura, con lo que se mejora el uso para las personas. Procuramos que las investigaciones del Departamento fomenten la eficiencia energética y un mejor uso de los recursos”.

En las pruebas de campo realizadas en los tres negocios, el parámetro que se utilizó fue la relación entre la cantidad de pupusas/tortillas cocidas en la plancha y el consumo de gas total, primero con la plancha normal utilizada en cada establecimiento y luego con la plancha eficiente. En términos económicos, los resultados mostraron que en un negocio que opera 25 días al mes el ahorro durante el mismo período es de \$119 colones salvadoreños, que equivalen a unos \$13.6 dólares estadounidenses, lo cual es un buen ahorro para su economía.

Luego de las diversas pruebas, el modelo de plancha eficiente ya puede ser comercializado. Actualmente, un banco se encuentra desarrollando un plan para abrir líneas de crédito que les permitan a pequeños empresarios y emprendedores hacerse con una (fuente: UCA/DICYT).

## Tejados verdes contra contaminación en las ciudades



Cada vez son más las ciudades que tienen problemas con la calidad del aire que respiran, generalmente éste se encuentra entre regular y malo, y no son pocos los días en que se decreta alerta ambiental. Al respecto, la alumna Paula Anza, estudiante de la doble titulación del grado en Ciencias Ambientales y en Ingeniería Forestal de la Universidad Católica de Ávila (UCAV, España), ha publicado sus estudios sobre tejados verdes en la prestigiosa revista *Urban Forestry & Urban Greening*, una de las más importantes del sector forestal a nivel internacional. El TFG plantea la utilización de la naturaleza para solucionar los problemas ambientales en entornos urbanos. La implantación de tejados verdes en las ciudades produciría multitud de beneficios ambientales, sociales y económicos.

Este trabajo ha sido tutorado por los profesores Javier Velázquez, Javier Gutiérrez y Beatriz Sánchez, pertenecientes al grupo de investigación Técnicas para la Planificación Integral y la Gestión Sostenible del Territorio. La investigación propone una

metodología a través de la cual poder seleccionar, dentro de un entorno urbano, la mejor ubicación posible para la instalación de tejados verdes. El estudio se ha llevado a cabo sobre la ciudad de Madrid, pero este método puede extrapolarse a cualquier zona urbana del mundo.

Dado que los problemas ambientales que surgen en entornos urbanos van en aumento, se plantea la idea de emplear estas estructuras como una forma de reducir sus consecuencias negativas. Gracias a los tejados verdes se consigue mejorar la calidad de vida de los habitantes de estas zonas tan urbanizadas desde un punto de vista económico, sanitario y ambiental. Mejoran el aislamiento térmico y acústico de las viviendas, reduciendo así el consumo eléctrico, ayudan a filtrar la contaminación atmosférica, captan el agua de lluvia, favorecen el desarrollo de la biodiversidad y reducen el efecto “isla de calor” (fuente: UCAV/DICYT).



Colaboradores

# COLABORADORES

## **Alexis Arturo Aguirre Roldán**

Estudiante de la Ingeniería en Sistemas Computacionales, con especialidad en Sistemas Distribuidos, en el ITQ. Trabaja en el uso de minisubmarinos no tripulados, sistemas de rehabilitación física mediante realidad virtual y aumentada y sistemas criptográficos. Miembro del grupo de seguridad de ISACA-ITQ.

## **Armando V. Flores Salazar**

Licenciado en Arquitectura, especialista en diseño arquitectónico y maestro en Ciencias por la UANL. Doctor en Arquitectura por la UAM. Maestro de tiempo completo y en la FARq-UANL. Sus líneas de investigación son los objetos arquitectónicos como objetos culturales, con subtemas como lectura arquitectónica y la arquitectura como documento histórico. Miembro del SNI, nivel II.

## **Bárbara Bermúdez Reyes**

Doctora en Metalurgia y Ciencias de los Materiales por la UMSNH. Profesora-investigadora del Centro de Investigación e Innovación en Ingeniería Aeronáutica de la UANL. Representante nacional de UNISEC-México. Pertenece a la Red de Ciencia Tecnología Espacial y a la AIAA. Certificada en satélites cansat por la Keio University-UNISEC y en pruebas térmicas, mecánicas y de vacío en satélites por el Instituto de Tecnología de Kyushu. Miembro del SNI, nivel I.

## **César Elizondo González**

Ingeniero mecánico electricista, licenciado en Ciencias Físico-Matemáticas, maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, con especialidad en Electrónica y Control, y doctor en Ingeniería Eléctrica, con especialidad en Control Automático, por la UANL. Su interés principal está en el control robusto paramétrico y control lógico.

## **Cornelio Posadas-Castillo**

Ingeniero en Control y Computación por la UANL. Maestro en Electrónica y Telecomunicaciones, con especialidad en Control Automático, por el CICESE. Doctor en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica, con especialidad en Control, por la UABC.

## **Daniel Sifuentes Espinoza (1956-2018)**

Licenciado en Filosofía e Historia y maestro en Metodología de la Ciencia por la UANL. Autor de *Las Elecciones en Nuevo León (1917-1929)* y de *Luis de Carvajal y de la Cueva*. Investigador en el Centro de Información de Historia Regional de la UANL.

## **Efraín Alcorta-García**

Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones y maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica por la UANL. Doctor en Ingeniería Eléctrica por la Universidad de Gerhard Mercator de Duisburg, Alemania. Sus intereses de investigación incluyen el diagnóstico y el control tolerante a fallos. Miembro del SNI, nivel I.

## **Jesús Francisco Espinoza Fierro**

Licenciado en Matemáticas por la UniSon. Doctor en Ciencias Matemáticas, con especialidad en Topología Algebraica, por la UNAM. Profesor-investigador e integrante del núcleo básico del Programa de Posgrado de Matemáticas de la UniSon. Cuenta con perfil Prodep. Sus líneas de interés son la geometría computacional, teorías de homología y series de tiempo simpliciales, así como sus aplicaciones en ciencia de datos en el área de la salud, medio ambiente y mercados de criptoactivos. Miembro del SNI, nivel candidato.

## **José Rubén Morones Ibarra**

Licenciado en Ciencias Físico-Matemáticas por la UANL. Doctor en Física, en el área de Física Nuclear Teórica, por la University of South Carolina, USA. Profesor de tiempo completo en la FC-FM-UANL.

## **Lizangela Guerra Fuentes**

Ingeniera mecánica, maestra en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, con especialidad en Materiales, y doctora en Ingeniería de Materiales por la UANL. Profesora-investigador de la FIME-UANL. Participa en el Posgrado en Manufactura de la FIME-UANL y es colaboradora del cuerpo académico en Ciencias de la Ingeniería Avanzada. Sus áreas de estudio versan sobre la caracterización de microestructura en aceros avanzados, transformación de fases y nanoindentación. Miembro de SNI, nivel I.

## **Luis Arturo Reyes Osorio**

Ingeniero mecánico administrador, maestro en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, con especialidad en Materiales, y doctor en Ingeniería de Materiales por la UANL. Profesor-investigador de la FIME-UANL. Cuenta con perfil deseable Prodep. Participa en el Posgrado en Ingeniería Aeronáutica, líder del cuerpo académico en Ciencias de la Ingeniería Avanzada. Su área de investigación tiene que ver con el estudio de procesos de unión, desarrollo de recubrimientos, fundición de aleaciones no ferrosas y modelación de procesos mecánicos. Miembro del SNI, nivel I.

**Luis Enrique Gómez Vanegas**

Licenciado en Letras Hispánicas por la UANL. Diplomado en periodismo científico por la FCC-UANL. Autor del libro *Soledades*. Corrector y gestor editorial de la revista *Ciencia UANL* y corrector de *Entorno Universitario*, revista de la Preparatoria 16-UANL.

**M. Angélica Salazar Aguilar**

Ingeniera en Sistemas Computacionales por el ITQ. Maestra en Ciencias y doctora en Ingeniería de Sistemas por la UANL. Estancia posdoctoral en el Centre Interuniversitaire de Recherche Sur les Reseaux D'entreprise, la Logistique et le Transport (CIRRELT), en Montréal, Canadá. Profesora titular A en el Programa de Posgrado en Ingeniería de Sistemas y secretaria de Investigación de la Subdirección de Estudios de Posgrado de la FIME-UANL. Sus áreas de interés abarcan la formulación matemática de problemas de optimización, así como la aplicación y diseño de técnicas de solución derivadas de la investigación operativa. Miembro fundador de la SMIO y del SNI, nivel I.

**Manuel Alejandro Gutiérrez Martínez**

Ingeniero en Mecatrónica por la UANL. Su área de investigación se centra en el desarrollo de recubrimientos nanoestructurados  $\text{SiO}_2\text{-TiO}_2$ .

**María Aracelia Alcorta García**

Doctora en Ingeniería Física Industrial por la UANL. Estancia posdoctoral en la Universidad de California en San Diego. Profesora titular del Programa de Ingeniería Física Industrial-UANL. Fundadora del Programa de Posgrado en Ciencias con Orientación en Matemáticas de la FCFM-UANL. Su área de investigación son las matemáticas aplicadas, específicamente control no lineal *risk-sensitive* estocástico. Miembro del SNI, nivel I.

**Mario Alberto López-Vega**

Ingeniero en Electrónica y Comunicaciones por la UAZ. Maestro en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica por la UANL. Estudiante del Doctorado en Ciencias de la Ingeniería Eléctrica. Su interés de investigación es sobre control robusto paramétrico.

**Mónica del Carmen Menchaca Maciel**

Licenciada en Física y doctora en Ingeniería Física Industrial por la UANL. Asesora independiente en análisis y minería de datos.

**Patricia Zambrano Robledo**

Ingeniera mecánica, maestra en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, con especialidad en Materiales, y doctora en Ingeniería de Materiales por la UANL. Miembro de SNI, nivel II, y de la AMC. Directora de Investigación de la UANL.

**Pedro César Cantú Martínez**

Doctor en Ciencias Biológicas. Trabaja en la FCB-UANL y participa en el IINSO-UANL. Su área de interés profesional se refiere a aspectos sobre la calidad de vida e indicadores de sustentabilidad ambiental. Fundador de la revista *Salud Pública y Nutrición (RES-PyN)*. Miembro del Comité Editorial de Artemisa del Centro de Información para Decisiones en Salud Pública de México.

**Roger Z. Ríos Mercado**

Licenciado en Matemáticas por la UANL. Maestro y doctor en Ciencias en Investigación de Operaciones e Ingeniería Industrial por la Universidad de Texas en Austin. Profesor titular A en la División de Posgrado en Ingeniería de Sistemas de la FIME-UANL. Sus áreas de interés se enfocan en la investigación de operaciones como soporte científico a los problemas de toma de decisiones, desarrollo de modelos y algoritmos eficientes para la solución de problemas de optimización combinatoria, en particular en problemas de localización, diseño territorial, ruteo y transporte, secuenciación de operaciones, con aplicaciones recientes en la gestión óptima de sistemas forestales y de salud pública, en sistemas de manufactura y sistemas de redes de transporte de gas natural. Líder del cuerpo académico de "Optimización metaheurística" de la UANL. Miembro de la Academia Mexicana de Computación, del SNI, nivel II, y de la AMC.

**Rosalía Guadalupe Hernández Amador**

Licenciada en Matemáticas por la UniSon. Maestra en Ciencias Matemáticas por la UNAM. Doctora en Ciencias Matemáticas por la UniSon. Sus líneas de investigación son la geometría (diferencial y discreta) y sus aplicaciones en ciencia de datos.

**Santiago Miguel Fernández Fraga**

Ingeniero en Sistemas Electrónicos por el ITESM, campus Querétaro, en 1989. Maestro en Ciencias Computacionales, con especialidad en Sistemas Distribuidos, y doctor en Ciencias de la Computación por la UAQ. Académico de tiempo completo en el Departamento de Sistemas Computacionales-ITQ. Coordinador de Proyectos de Investigación, sus líneas de investigación son en inteligencia artificial, análisis de señales y sistemas distribuidos e innovación tecnológica.

**Yitzhak David Gutiérrez Moya**

Licenciado en Matemáticas por la UniSon. Estudiante de la Licenciatura en Ciencias de la Computación de la UniSon. Colaborador en el grupo de trabajo en Análisis Topológico de Datos-UniSon a través del Proyecto Prodep Métodos de topología combinatoria en el análisis de datos, para actividades de investigación en geometría computacional.

# Lineamientos de colaboración

## *Ciencia UANL*

La revista *Ciencia UANL* tiene como propósito difundir y divulgar la producción científica, tecnológica y de conocimiento en los ámbitos académico, científico, tecnológico, social y empresarial. En sus páginas se presentan avances de investigación científica, desarrollo tecnológico y artículos de divulgación en cualquiera de las siguientes áreas: ciencias exactas, ciencias de la salud, ciencias agropecuarias, ciencias naturales, humanidades, ciencias sociales, ingeniería y tecnología y ciencias de la tierra. Asimismo, se incluyen artículos de difusión sobre temas diversos que van de las ciencias naturales y exactas a las ciencias sociales y las humanidades. Las colaboraciones deberán estar escritas en un lenguaje claro, didáctico y accesible, correspondiente al público objetivo; no se aceptarán trabajos que no cumplan con los criterios y lineamientos indicados, según sea el caso se deben seguir los siguientes criterios editoriales.

### **Criterios editoriales (difusión)**

- Sólo se aceptan artículos originales, entendiendo por ello que el contenido sea producto del trabajo directo y que una versión similar no se haya publicado o enviado a otras revistas.
- Se aceptarán artículos con un máximo de cinco autores, en caso de excederse se analizará si corresponde con el esfuerzo detectado en la investigación.
- El artículo debe ofrecer una panorámica clara del campo temático.
- Debe considerarse la experiencia nacional y local, si la hubiera.
- No se aceptan reportes de mediciones. Los artículos deben contener la presentación de resultados de medición y su comparación, también deben presentar un análisis detallado de los mismos, un desarrollo metodológico original, una manipulación nueva de la materia o ser de gran impacto y novedad social.
- Sólo se aceptan modelos matemáticos si son validados experimentalmente por el autor.
- No se aceptarán trabajos basados en encuestas de opinión o entrevistas, a menos que aunadas a ellas se realicen mediciones y se efectúe un análisis de correlación para su validación.
- Para su consideración editorial, el autor deberá enviar el artículo vía electrónica en formato .doc de Word, así como el material gráfico (máximo cinco figuras, incluyendo tablas), fichas biográficas de cada autor de máximo 100 palabras y carta firmada por todos los autores (formato en página web) que certifique la originalidad del artículo y cedan derechos de autor a favor de la UANL.
- Los originales deberán tener una extensión máxima de cinco páginas (incluyendo figuras y tablas).
- Se incluirá un resumen en inglés y español, no mayor de 100 palabras, incluir cinco palabras clave.
- Las referencias se deberá utilizar el formato Harvard para citación.
- Material gráfico incluye figuras, imágenes y tablas, todas las imágenes deberán ser de al menos 300 DPI.

## Criterios editoriales (divulgación)

- Sólo se reciben para su publicación materiales originales e inéditos. Los autores, al enviar su trabajo, deberán manifestar que es original y que no ha sido postulado en otra publicación.
- Se aceptarán artículos con un máximo de tres autores.
- Los contenidos científicos y técnicos tienen que ser conceptualmente correctos y presentados de una manera original y creativa.
- Todos los trabajos deberán ser de carácter académico. Se debe buscar que tengan un interés que rebase los límites de una institución o programa particular.
- Tendrán siempre preferencia los artículos que versen sobre temas relacionados con el objetivo, cobertura temática o lectores a los que se dirige la revista.
- Para su mejor manejo y lectura, cada artículo debe incluir una introducción al tema, posteriormente desarrollarlo y finalmente plantear conclusiones. Se recomienda sugerir bibliografía breve, para dar al lector posibilidad de profundizar en el tema. El formato no maneja notas a pie de página.
- Las referencias no deben extenderse innecesariamente, por lo que sólo se incluirán las referencias citadas en el texto.
- Los artículos deberán tener una extensión máxima de cinco cuartillas y una mínima de tres, incluyendo tablas, figuras y bibliografía. En casos excepcionales, se podrá concertar con el editor responsable de *Ciencia UANL* una extensión superior, la cual será sometida a la aprobación del Consejo Editorial.
- Las figuras, dibujos, fotografías o imágenes digitales deberán ser de al menos 300 DPI.
- En el caso de una reseña para nuestra sección Al pie de la letra, la extensión máxima será de dos cuartillas, deberá incluir la ficha bibliográfica completa, una imagen de la portada del libro, por la naturaleza de la sección no se aceptan referencias.
- El artículo deberá contener claramente los siguientes datos en la primera cuartilla: título del trabajo, autor(es), institución y departamento de adscripción laboral (en el caso de estudiantes sin adscripción laboral, referir la institución donde realizan sus estudios), dirección de correo electrónico para contacto.

\*Nota importante: todas las colaboraciones, sin excepción, serán evaluadas. Todos los textos son sometidos a revisión y los editores no se obligan a publicarlos sólo por recibirlos. Una vez aprobados, los autores aceptan la corrección de textos y la revisión de estilo para mantener criterios de uniformidad de la revista.

Todos los artículos deberán remitirse a la dirección de correo:

revista.ciencia@uanl.mx

o bien a la siguiente dirección:

Revista *Ciencia UANL*. Dirección de Investigación, Av. Manuel L. Barragán, Col. Hogares

Ferrocarrileros, C.P. 64290, Monterrey, Nuevo León, México.

Para cualquier comentario o duda estamos a disposición de los interesados en:

Tel: (5281)8329-4236. <http://www.cienciauanl.uanl.mx/>



# CREALTHI

## Diplomado de **Emprendimiento Científico** en la UANL

Las universidades, a nivel global, están trascendiendo sus funciones tradicionales de investigación, enseñanza y difusión del conocimiento a un rol más activo de creación de empresas universitarias (spin-offs) y promoción del emprendimiento académico.

Además, cabe señalar que la investigación científica, a menudo, conforma la base de productos innovadores y es el cimiento para la creación de nuevas industrias. Incluso se considera que empresas universitarias derivadas de la investigación podrían contribuir de manera activa y directa al desarrollo tecnológico y al crecimiento económico global.

Sin embargo, de acuerdo, a una encuesta realizada por la revista Nature (Brody, 2017), la carencia de habilidades de negocio es una de las principales barreras para que los investigadores decidan emprender con sus proyectos de investigación.

La UANL, por su parte, promueve **CREALTHI (Creación de empresas de alto impacto por investigadores)**, un mecanismo de impulso para el desarrollo de spin-offs universitarias que tiene como propósito brindar a los investigadores herramientas que les permitan desplegar el conocimiento desarrollado en un modelo comercial rentable y escalable.

**CREALTHI** cuenta con dos etapas: una de formación y otra de acompañamiento.

Durante la **etapa de formación**, los investigadores desarrollan habilidades de emprendimiento a través de cinco módulos con experiencias significativas de aprendizaje que incluyen temas que van desde el entendimiento del cliente, hasta la validación de su propuesta de valor y la creación de empresas.

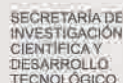
Durante la **etapa de acompañamiento**, los investigadores llevan sesiones de mentoría durante su proceso de validación y creación de la empresa, acompañados de mentores académicos y empresarios.

Los **mentores académicos** son profesores de la misma UANL que se desempeñan de manera exitosa en diversas áreas del conocimiento relativas al desarrollo de los proyectos de emprendimiento que se estarán trabajando durante el programa.

Los **mentores empresarios** son personalidades importantes en el ecosistema empresarial que, sin duda alguna, conocen ampliamente los temas de negocios y que pueden compartir sugerencias y opiniones trascendentales.

**CREALTHI** es un proyecto que, aunque en primera instancia es localizado y enfocado al contexto de la UANL, tiene el potencial para colocarse como referente en todo el país y se espera que pueda escalar para lograr llevar el conocimiento a más investigadores que tengan la inquietud de emprender con sus investigaciones, para de esta manera llevar a México **del laboratorio a la economía del conocimiento**.

**Dr. Francisco Jesús Barrera Cortinas**  
Director de Innovación y Emprendimiento  
Coordinador del Programa





**TRABAJAR  
TRANSFORMAR  
TRASCENDER**



Indexada en:



Actualidad Iberoamericana  
Índice Internacional de Revistas



ÍNDICE DE REVISTAS MEXICANAS  
DE DIVULGACIÓN CIENTÍFICA Y TECNOLÓGICA



CATÁLOGO "HEMEROTECA LATINOAMERICANA"