



**EDUCACIÓN**  
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

REVISTA DIGITAL

# TEC TUXTLA

ISSN:2992-7889



*Ciencia y Tecnología  
con Sentido Humano*

Revista de Divulgación Científica  
del Instituto Tecnológico de  
Tuxtla Gutiérrez

**No. 1**

Publicación semestral  
Semestre **enero-junio 2023**



## CINTILLO LEGAL

**TEC TUXTLA**, número 1, enero – junio 2023, es una publicación semestral editada por el Tecnológico Nacional de México, Avenida Universidad 1200, Alcaldía Benito Juárez, C.P. 03330, teléfono 5536002511 Ext. 65092, correo [d\\_vinculacion05@tecnm.mx](mailto:d_vinculacion05@tecnm.mx), a través del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, Carretera Panamericana km. 1080, C.P. 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Contacto: 01 961 615 0461, [plan\\_tgutierrez@tecnm.mx](mailto:plan_tgutierrez@tecnm.mx), [www.tuxtla.tecnm.mx](http://www.tuxtla.tecnm.mx). **Editor Responsable:** Luis Alberto Pérez Lozano. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo: 04-2023-041116373200-102, ISSN: 2992-7889, ambos otorgados por el Instituto Nacional de Derechos de Autor. Responsable de la última actualización de este Número, Departamento de Comunicación y Difusión, Ana Erika Pérez Galindo, Carretera Panamericana km. 1080 C.P 29050. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. Fecha de la última modificación: 23 de mayo de 2023.

Queda prohibida la reproducción total o parcial en cualquier medio, del contenido de la presente revista electrónica, sin contar con la autorización del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

### **Presidente del Consejo Editorial**

Luis Alberto Pérez Lozano  
Subdirección de Planeación y Vinculación

Correo: [plan\\_tgutierrez@tecnm.mx](mailto:plan_tgutierrez@tecnm.mx)

Teléfono: 961 615 0461 extensiones: 400, 401

URL de la Revista: <http://revista.tuxtla.tecnm.mx/>



**Director del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez**  
José Manuel Rosado Pérez

## CONSEJO EDITORIAL

### **Presidente del Consejo Editorial**

Luis Alberto Pérez Lozano  
*Subdirección de Planeación y Vinculación*

### **Secretaria Técnica del Consejo Editorial**

Ana Erika Pérez Galindo  
*Departamento de Comunicación y Difusión*

## MIEMBROS

### **Juan Carlos Niños Torres**

*División de Estudios Profesionales*

### **Francisco Rangel Genovés Genovés**

*Oficina Editorial*

### **Amín Rodríguez Meneses**

*Departamento de División de Estudios  
de Posgrado e Investigación*

### **Gazelle Martínez Marín**

*Oficina de Difusión Escrita y Maquetación*

### **José Rigoberto Ruiz Gamboa**

*Departamento de Recursos Materiales*

### **Ethel Rosalí Vázquez del Porte**

*Oficina de Difusión Audiovisual*

### **René Arjón Castro**

*Centro de Información*

## COMITÉ EDITORIAL

Miguel Abud Archila

Rocío Meza Gordillo

Victor Manuel Ruiz Valdiviezo

Madaín Pérez Patricio

Carlos Ríos Rojas

Héctor Ricardo Hernández de León

Carlos Arias Castro

Pedro Tomas Ortiz y Ojeda

Idelberto de los Santos Ruiz

Edna Moráles Coutiño

Miguel Cid del Prado Martínez



## TEMARIO

ARTÍCULO	PÁGINA
De enjambres a algoritmos: El poder de los sistemas multiagentes en el control de sistemas dinámicos.	5
Evaluación del efecto del tipo de maíz sobre las propiedades sensoriales de bebidas tipo tastalate de cinco empresas chiapanecas.	18
Gemelo digital para diagnóstico de fugas.	25
Sensibilidad de agentes causales de infecciones intestinales a extractos orgánicos de Justicia spicigera.	44
El Filtro de Kalman: Un viaje por su historia, fundamento matemático y sus aplicaciones prácticas.	55
Identificación de sistemas aplicado a un proceso simple de intercambio de calor.	73



## **De enjambres a algoritmos: El poder de los sistemas multiagentes en el control de sistemas dinámicos**

López-Estrada, Francisco R.<sup>1\*</sup>, Valencia-Palomo; Culebro-Farrera, Delina<sup>1</sup>; De los Santos-Ruiz, Ildeberto<sup>1</sup>, Gómez-Peñate, Samuel<sup>1</sup>; Brindis-Velázquez Osvaldo<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, I. T. Tuxtla Gutiérrez, Grupo de Diagnóstico y Control TURIX-Dynamics, Carretera Panamericana S/N, C.P. 29050, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México.

<sup>2</sup>Tecnológico Nacional de México, I. T. Comitán, Av. Instituto Tecnológico Km. 3.5 Colonia Yocnajib, El Rosario, C.P. 30000, Comitán de Domínguez, Chiapas, México.

Todas las imágenes de este artículo se encuentran bajo licenciamiento Creative Commons.

\*Autor para correspondencia: [frlopez@tuxtla.tecnm.mx](mailto:frlopez@tuxtla.tecnm.mx)

### **RESUMEN**

En este trabajo se realiza un revisión de la teoría de los sistemas multiagentes, los cuales están basados en comportamientos biológicos inspirados de la naturaleza. Estos algoritmos se analizan desde el punto de vista de control automático y se hace una discusión breve de sus contribuciones en el área de sistemas computacionales. Se revisan algunos trabajos publicados en prestigiosas revistas y se discuten retos y oportunidades para realizar investigación de frontera en esta área novedosa y desafiante.

**Palabras clave:** Sistemas multiagentes, control colaborativo, enjambre de robots.

### **INTRODUCCIÓN**



Recientemente se ha estudiado el control cooperativo de sistemas multiagente (MAS) para conseguir un objetivo común de varios agentes en tareas donde un solo agente no tendría éxito. Un MAS está conformado por un conjunto de agentes que cooperan o compiten entre sí para alcanzar un objetivo en común. Estos sistemas encuentran su inspiración en la naturaleza, principalmente de sistemas biológicos debido a la eficiencia, adaptabilidad y capacidad de autoorganización que se encuentran en ellos [1]. Por ejemplo, basado en enjambre de insectos como las abejas o las hormigas, los cuales son famosos por su comportamiento colaborativo y coordinado. Otros en aves migratorias o cardúmenes de peces los cuales tienen amplias características de cooperación, autoorganización y adaptabilidad. Sistemas sociales de animales como colonias de hormigas o las manadas de lobos los cuales exhiben comportamientos complejos de cooperación, división de tareas y resolución de problemas en grupo. Algunos más modernos se inspiran en la evolución genética donde se consideran conceptos como la selección natural, la reproducción y la mutación para encontrar soluciones óptimas para adaptarse y mejorar su desempeño a lo largo del tiempo.

Algunos ejemplos de estos se muestran en la **Figura 1**.



a)



b)



c)



d)

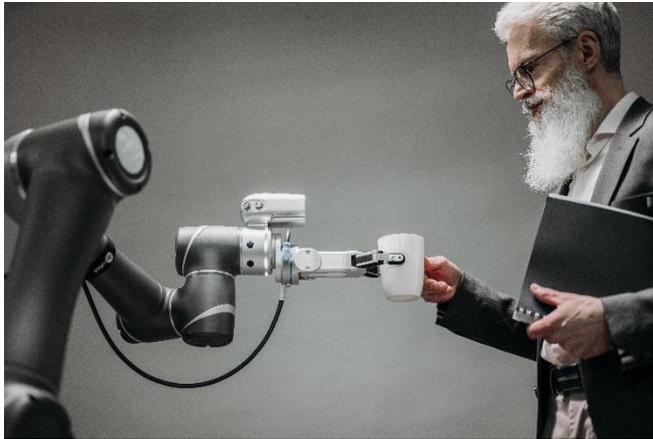
**Figura 1:** Ejemplos de sistemas de cooperación en la naturaleza. a) Hormigas, b) Cardumenes, c) Parvada de patos, d) Manada de lobos.

Desde el punto de vista del control automático, un agente se define como un elemento del sistema que de forma autónoma realiza acciones a través de sus actuadores en función de los datos obtenidos de su entorno a través de sensores. Es decir, los agentes son “entidades” computacionales que perciben su entorno, toman decisiones y llevan a cabo acciones para influir en dicho entorno.

Por otro lado, en el campo de la computación, los MAS se refieren a programas de software que interactúan y cooperan entre sí para resolver problemas complejos o llevar a cabo tareas específicas, los cuales son la base de algunas técnicas de la inteligencia artificial y la computación distribuida. La principal diferencia, es que en control automático los MAS se utilizan para diseñar y controlar sistemas físicos complejos, como procesos industriales, cobots, enjambres de robots, sistemas de tráfico, entre otros [3-6], tal como se muestra en la Figura 2. Mediante la coordinación y la comunicación entre los agentes se diseñan algoritmos de control que mejoran el desempeño del sistema y garantizan la estabilidad y seguridad. Por otro lado, en la computación, los MAS se aplican a problemas computacionales complejos o realizar tareas específicas que se benefician de la distribución de la carga de trabajo entre múltiples agentes. Por ejemplo, en aplicaciones de



planificación, optimización, coordinación de recursos o el razonamiento distribuido para lograr una solución eficiente y escalable.



a)



b)

**Figura 2:** a) Robot colaborativo. b) Grupo de robots móviles que realizan una tarea de colaboración y seguimiento.

Aunque ambas áreas utilizan el término "sistemas multiagentes", su enfoque es completamente diferente y por tanto la matemática y base teórica también lo es. Este trabajo se enfoca en el estudio de sistemas multiagentes desde el punto de vista del control automático.

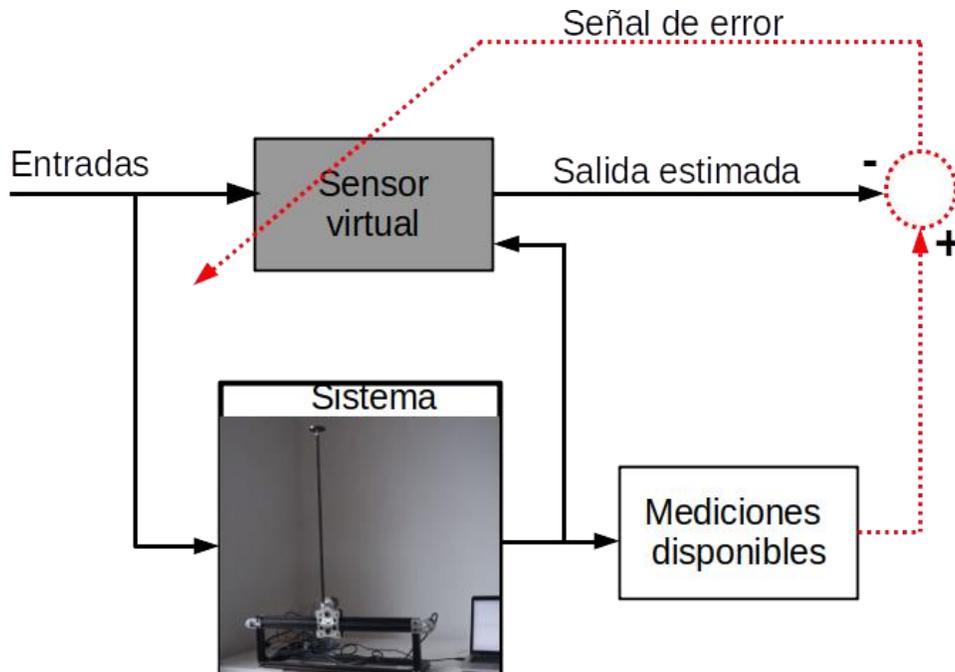
Los MAS se clasifican de acuerdo a su estructura física [6], agentes idénticos se denominan homogéneos, por ejemplo, una flota de robots idénticos como el de la Figura 2-(b), o un parque de aerogeneradores, etc. Por otro lado, cuando el MAS está integrado por sistemas no idénticos se denomina heterogéneo o no homogéneo, por ejemplo, sistemas de microrredes o sistemas como el de Space X, en donde un cohete aterriza sobre una plataforma robótica en el mar. Algunas aplicaciones de los MAS se encuentran en el campo de la robótica móvil [6], transporte [7], sistemas de microrredes [8], parques eólicos [9], entre otros.



Recientemente, se han explorado los sistemas de control tolerantes a fallos (FTC) para MAS con el fin de aumentar la fiabilidad y seguridad de dichos sistemas [10]. En estos casos lo que se busca es que en caso de una falla el agente siga manteniendo un desempeño requerida incluso degradado, sin que esto signifique que no se complete la tarea o que al fallar un agente se pierda la formación y se causen colisiones. Por ejemplo en formación de drones, como lo sucedido en los juegos de Tokio en donde 1800 drones formaron la superficie de la tierra, sin uno de estos hubiese fallado pudo haber causa múltiples colisiones, que no solo comprometen la colaboración de los agentes, sino que también la seguridad del evento; por ello el investigar sistemas de control tolerantes a fallos en sistemas multiagentes es un área de oportunidad para realizar investigación de frontera y aplicaciones reales.

## **CONTROL Y DIAGNOSTICO DE FALLAS DE SISTEMAS MULTIAGENTES**

El grupo de investigación TURIX-Dynamics que forma parte del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez ha desarrollado diferentes métodos de control basados en modelos y sensores virtuales, también conocidos como observadores de estados. El control basado en modelos está limitado en la representación completa del sistema ya que una representación exacta requiere un modelo matemático muy complejo. Sin embargo, los físicos y matemáticos proporcionan a los ingenieros modelos matemáticos que representan lo suficiente para mantener en control los sistemas. Por lo general, para fines de control, el sistema se representa en un espacio de estados, donde un vector de variables de estado proporciona la información del sistema modelado como posición, velocidad, aceleración, flujo, temperatura, etc.



**Figura 3:** Esquema tradicional de control basado en sensores virtuales

Este proceso se ilustra en la Figura 3, el cual representa un sistema de control retroalimentado de un péndulo invertido. En este caso las entradas son las señales de voltaje que se envían a motor del péndulo y las mediciones disponibles corresponden a los desplazamientos estimados mediante un sensor encoder. Sin embargo, en este caso, si se asume que no se conoce la velocidad, un sensor virtual podría estimar dicho valor mediante el conocimiento del modelo matemático, la entrada conocida y la señal medida.

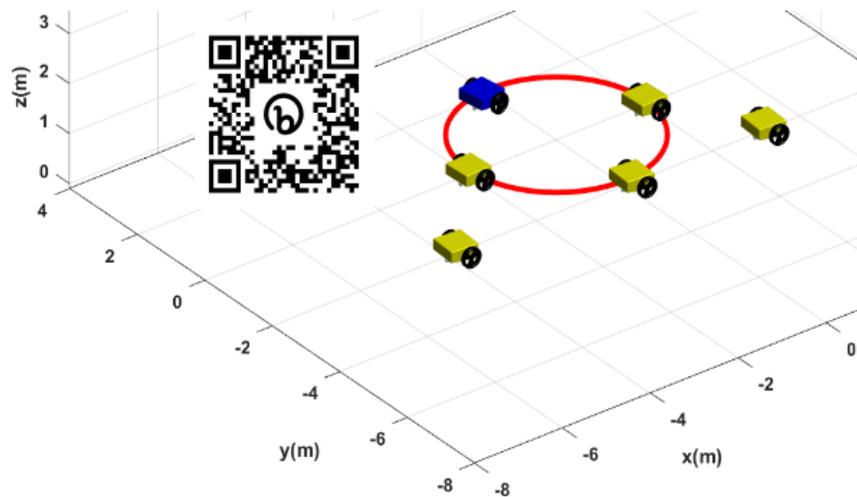
En control colaborativo, el problema es más complejo, y al igual que en los sistemas tradicionales usualmente se consideran variables que no se miden como velocidades, además del problema de comunicación entre los agentes. En general, el control cooperativo puede dividirse en tres enfoques principales. El primero se centra en la sincronización física entre agentes, es decir, si existe o no un desplazamiento físico coordinado entre los agentes. La segunda está relacionada con la existencia de un agente líder. Si el agente líder existe se denomina *consenso líder-seguidor*. El agente líder actúa como generador de órdenes y proporciona a los *agentes*



*seguidores* la trayectoria deseada. Por ejemplo, una formación de robots como la que se muestra en la Figura 2-b. Si no existe un agente líder, el sistema se denomina *consenso sin líder*. Finalmente, está el problema de liderar con MAS homogéneos y no homogéneos; esta clasificación divide los MAS dependiendo de si toda la colección de sistemas tiene un comportamiento dinámico idéntico o si al menos uno de los agentes de la colección es diferente. En particular, en esta última categoría, existe una diferencia notable en el modelo matemático lo cual dificulta aún más el diseño del sistema de control.

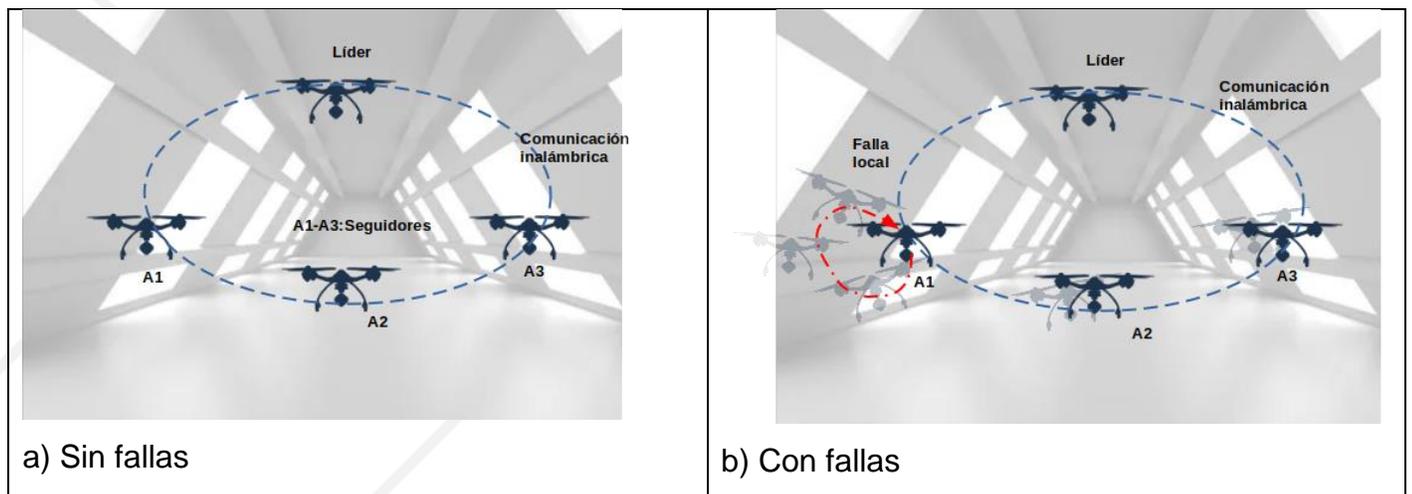
Recientemente en el trabajo de Darías y col. [11], quien forma parte del grupo TURIX, propuso un esquema de control cooperativo convexo para un sistema multiagente de robots móviles diferenciales en formación líder-seguidor. Primeramente se obtuvo el modelo cinemático de los robots diferenciales y mediante un enfoque de modelo de referencia se logró el control de trayectoria del líder. Para complementar el esquema líder-seguidor (con 5 agentes seguidores), se diseñó un protocolo de control distribuido basado en la teoría de grafos para llegar al consenso de los seguidores.

El resultado del algoritmo se puede consultar en [11], así como en el vídeo demostrativo señalado en la Figura 4. La animación y los resultados más a detalle se encuentran disponible en el link de YouTube (<https://bit.ly/lpvmas1>) o mediante el escaneó del código QR. Los resultados muestran que los algoritmos diseñados son eficientes y tienen buen desempeño manteniendo la formación. Aunque estos resultados aún son simulados, futuras versiones del algoritmo se implementaran sobre robots reales.



**Figura 4:** Control colaborativo en formación líder seguidor de 6 robots móviles.

Por otro lado, dado que los agentes son sistemas físicos que cuentan con instrumentos como sensores y actuadores, están sujetos a fallos que ponen en riesgo las formaciones o la integridad del sistema de control, por lo cual es de suma importancia contar con algoritmos de control que detecten esos fallos a tiempo para evitar pérdidas de la formación.



**Figura 4:** Conjunto de drones en formación líder seguidor



El objetivo de un sistema de diagnóstico de fallos es generar una alarma cuando se produce un fallo, así como detectar, localizar y estimar la magnitud del elemento defectuoso. Tome el ejemplo de la Figura 5 que muestra a un conjunto de drones en formación líder-seguidor. En condiciones nominales de operación, es decir sin fallas, la formación se mantiene; sin embargo, en el supuesto de que uno de los drones sufriera una falla como sería un daño en uno de los rotores, el esquema de formación se rompe, y por tanto podría provocar colisiones o dejar irreconocible la formación. En el trabajo publicado por el Grupo TURIX en [12] se propuso una estrategia convexa que mediante un sensor virtual de tipo proporcional integral estima fallas en actuadores. Además de considerar que el enfoque es robusto, para garantizar que el ruido de medición y las perturbaciones externas no generen falsas alarmas. Sin embargo, es importante remarcar que el trabajo tuvo como limitaciones que se dedicó únicamente al diagnóstico, es decir a caracterizar la falla. Futuros trabajos deben enfocarse a garantizar el desempeño del MAS, aún bajo la condiciones de desempeño degradado.

## **CONCLUSIONES**

Los sistemas multiagente están revolucionando el mundo de la robótica y el control automático debido sobre todo a la conectividad de los sistemas que ha tenido un crecimiento exponencial en años recientes. Tanto desde el enfoque de control automático como desde la perspectiva de la computación, los MAS ofrecen un marco sólido y versátil para abordar problemas de colaboración, coordinación y optimización, que no serían posibles de lograr con sistemas de un solo agente. En el campo del control automático aún se tienen muchos retos para el desarrollo e investigación en este tipo de sistemas que involucra sobre todo retos de comunicación inalámbrica, coordinación, sensorica, programación, robustez, confiabilidad, seguridad e implementación física. Por lo cual, el estudio de estos sistemas ofrece un paradigma prometedor para abordar problemas complejos y desafiantes, y su aplicabilidad se extiende a una amplia gama de campos y aplicaciones desde la robótica hasta sistemas de colaboración heterogénea.



## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México quien ha financiado las investigaciones que fueron clave para el desarrollo de esta publicación a través de la convocatoria 2023 de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico.

## REFERENCIAS

[1] Fan, X., Sayers, W., Zhang, S., Han, Z., Ren, L., & Chizari, H. (2020). Review and classification of bio-inspired algorithms and their applications. *Journal of Bionic Engineering*, 17, 611-631. Chen, X., Tianfield, H., & Du, W. (2021). Bee-foraging learning particle swarm optimization. *Applied Soft Computing*, 102, 107134.

[2] Xie, M., Zhang, W., Fan, C., Wu, C., Feng, Q., Wu, J., ... & He, B. (2020). Bioinspired soft microrobots with precise magneto-collective control for microvascular thrombolysis. *Advanced Materials*, 32(26), 2000366.

[3] Saffre, F., Hildmann, H., & Karvonen, H. (2021, July). The design challenges of drone swarm control. In *Engineering Psychology and Cognitive Ergonomics: 18th International Conference, EPCE 2021, Held as Part of the 23rd HCI International Conference, HCII 2021, Virtual Event, July 24–29, 2021, Proceedings* (pp. 408-426). Cham: Springer International Publishing.

[4] Liu, C., Jiang, B., Patton, R. J., & Zhang, K. (2019). Decentralized output sliding-mode fault-tolerant control for heterogeneous multiagent systems. *IEEE transactions on cybernetics*, 50(12), 4934-4945.

[5] Farrera Díaz, L. B. (2020). Estimación de Fallas en Sistemas Multi-Agentes Convexos. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, TecNM.



[6] Zhao, Y., Xian, C., Wen, G., Huang, P., & Ren, W. (2021). Design of distributed event-triggered average tracking algorithms for homogeneous and heterogeneous multiagent systems. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 67(3), 1269-1284.

[7] Ziyadullaev, D., Muhamediyeva, D., Ziyaeva, S., Xoliyorov, U., Kayumov, K., & Ismailov, O. (2023). Development of a traditional transport system based on the bee colony algorithm. In *E3S Web of Conferences* (Vol. 365, p. 01017). EDP Sciences.

[8] Khan, M. W., Wang, J., Ma, M., Xiong, L., Li, P., & Wu, F. (2019). Optimal energy management and control aspects of distributed microgrid using multi-agent systems. *Sustainable Cities and Society*, 44, 855-870.

[9] Gu, B., Meng, H., Ge, M., Zhang, H., & Liu, X. (2021). Cooperative multiagent optimization method for wind farm power delivery maximization. *Energy*, 233, 121076.

[10] Li, K., & Li, Y. (2021). Fuzzy adaptive optimal consensus fault-tolerant control for stochastic nonlinear multiagent systems. *IEEE Transactions on Fuzzy Systems*, 30(8), 2870-2885.

[11] Darial Helen, (2022), Control Colaborativo de vehículos móviles mediante técnicas convexas. Tesis de Maestría en Ciencias en Ingeniería Mecatrónica, TecNM.

[12] Farrera, B., López-Estrada, F. R., Chadli, M., Valencia-Palomo, G., & Gómez-Peñate, S. (2020). Distributed fault estimation of multi-agent systems using a proportional-integral observer: A leader-following application. *International Journal of Applied Mathematics and Computer Science*, 30(3), 551-560.



## **Evaluación del efecto del tipo de maíz sobre las propiedades sensoriales de bebidas tipo tascalate de cinco empresas chiapanecas**

Navarro-Gallegos, Rodrigo<sup>1</sup>, Ventura Canseco, Lucía M.C.<sup>1</sup>, Ruiz, Cáceres, Gilberto A.<sup>2</sup>, Alvarez-Gutiérrez, Peggy E<sup>1\*</sup>

<sup>1</sup>TecNM-Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. C.P. 29050.

<sup>2</sup>Facultad de Humanidades, Campus VI, Universidad Autónoma de Chiapas. Tuxtla Gutiérrez. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. C.P. 29050.

\*Autor para correspondencia: [peggy.ag@tuxtla.tecnm.mx](mailto:peggy.ag@tuxtla.tecnm.mx);  
[peggy.alvarez@hotmail.com](mailto:peggy.alvarez@hotmail.com)

### **RESUMEN**

El tasca late es una bebida chiapaneca que recientemente ha traído la atención de investigadores y de empresarios para contribuir a fomentar su consumo. Una materia prima importante de esta bebida es el maíz. Las características fisicoquímicas y bromatológicas del maíz como componente de la bebida pueden influir sobre las propiedades sensoriales del producto terminado. Es por ello que en este trabajo se valúa el efecto de cinco diferentes variedades de maíz sobre las propiedades sensoriales de la bebida preparada de tascalate a través de una escala hedónica. Los resultados demuestran que las diferentes variedades de maíz influyen en forma diferenciada sobre cada una de las propiedades sensoriales de la bebida preparada de tascalate.

**Palabras clave:** consumo local; bebidas tradicionales; evaluación sensorial.



## INTRODUCCIÓN

La tradición de consumir alimentos a base de maíz en México desde tiempos prehispánicos, masas en el estado de Chiapas en donde la riqueza de su gastronomía es muy evidente [1]. El papel central que juega el maíz en la gastronomía mexicana ha sido reconocido por la FAO al considerar patrimonio cultural del intangible de la humanidad en el año 2010[2].

En la actualidad el papel central que juega el maíz en la alimentación de los mexicanos es crucial para entender la cultura y los hábitos alimenticios pues hasta el día de hoy miles de platillos y bebidas se consumen actualmente en México, pues está presente en la alimentación diaria, en las celebraciones y los rituales [3].

Al ser México centro de origen existen en nuestro país diferentes variedades de esta planta. El sistema de producción del maíz incluye desde sistemas llamados milpa tradicionales y prehispánicos hasta sistemas de cultivo intensivo [4]. De las muchas formas que existen para el consumo de maíz existen aquellas que requieren del proceso de nixtamalización. Las diferentes formas de consumo de maíz incluye alimentos y bebidas. Los tradicionales atoles que se consumen como bebidas calientes en casi todo el país requieren maíz nixtamalizado, mientras que existen otras bebidas en las que el maíz se integra a otro grupo de ingredientes para ser bebidas frías.

En el sureste de México se consumen varias bebidas preparadas a base de maíz y cacao, en Oaxaca se consume “Tejate”, en Tabasco se consume en el “Chorete” y en Chiapas se consume el tascalate. El tasca late es una bebida en polvo molido usado para preparar una bebida fría tradicional. La formulación no está estrictamente definida y varía de acuerdo a la persona que la prepara. Sin embargo se puede decir que está compuesto principalmente de un 60% de maíz (*Zea mays*) tostado y molido, un 3% de cacao (*Theobroma cacao* L.) tostado y molido un bajo



porcentaje que varía entre el 0.3 y 0.5 % de canela (*Cinnamomum verum*) y achiote (*Bixa orellana*), último ingrediente es el que le dan su tradicional color. Además el tasca late suele tener entre un 35 y 40% de azúcar común (sacarosa). Esta bebida tiene aproximadamente un 5% de fibra y un 8% de proteína cruda [5].

El papel clave que juega el maíz en los atributos sensoriales del tasca late sido poco estudiado. Recientemente la producción de esta bebida ha dejado de ser artesanal y ha comenzado a producirse en en micro y pequeñas empresas establecidas en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez. Estas empresas han empezado a darle valor agregado al tasca late y comercializarlo en en empaques que permiten conservar la inocuidad y vida de anaquel del producto.

El objetivo de este trabajo fue evaluar el efecto del tipo de maíz sobre las cualidades sensoriales de olor, color, sabor y apariencia de la bebida tradicional “tascalate” elaboradas por cinco diferentes empresas que colaboran en la tienda social “Punto Tuxtleco” en la ciudad de Tuxtla Gutiérrez.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Material biológico**

La materia prima para la elaboración del polvo de tascalate fue proporcionada a cada empresa que elaboraba tascalate. Las variedades de maíz utilizadas fueron codificadas como VSA, PAS5, VS5, V4, PAS1. Además cada empresa elaboró una muestra con el maíz de su propio proveedor. A cada empresa se le entregó 5 kilos de maíz y el polvo se elaboró en forma independiente en cada empresa.

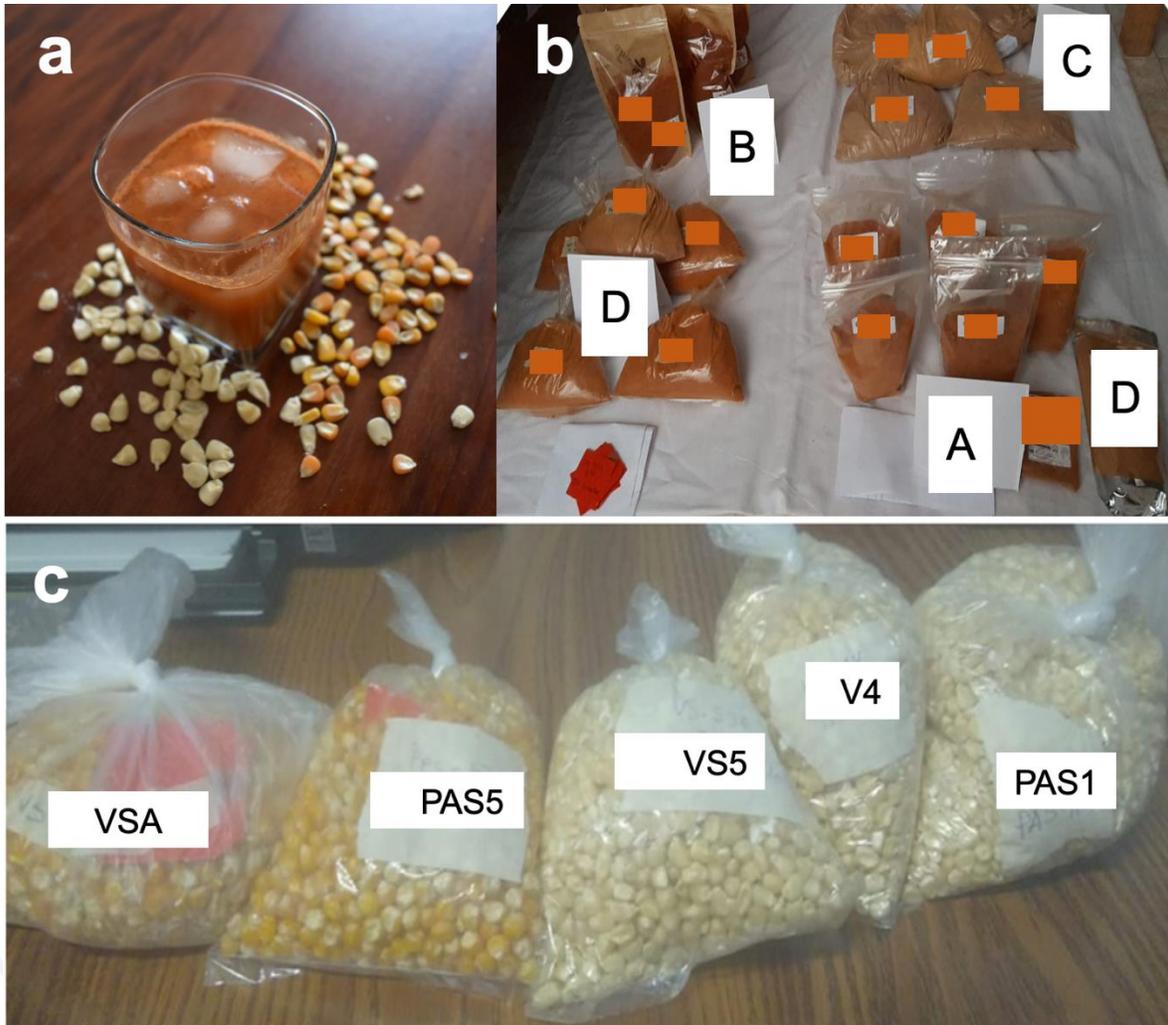


Las variables del proceso de producción de tascalate evaluadas se realizó por medio de entrevistas no estructuradas a los productores de las diferentes empresas. Además a cada muestra se le determinó el porcentaje de impurezas de la muestra y el tamaño del grano. Además se llevó a cabo una evaluación fisicoquímica básica mediante técnicas analíticas del pH [6], humedad [7] y color en un Colorímetro (marca ColorTec-PCM ®). La preparación de todas las bebidas se llevó a cabo preparando una solución de 5 % de polvo de tascalate en agua purificada potable sin azúcar. Evaluación sensorial.

La evaluación se realizó con un método afectivo con escala hedónica para determinar el grado de satisfacción correspondiente a las propiedades del producto, estas son: color, olor, consistencia y sabor. Se ordenó de posibles respuestas correspondientes a distintos grados de satisfacción equilibradas alrededor de cinco puntos, donde: 1, odié; 2, no me gustó; 3, indiferente; 4, me gustó; 5, me encantó. El análisis sensorial prueba se llevó a cabo con jueces no entrenados (n=120) de acuerdo a [8] . Donde se les presentaron muestras diferentes de producto en vasos de plástico transparentes de 30 mL. Para el análisis estadístico de los resultados se utilizó el software InfoStat ® mediante un de un análisis de varianza (ANOVA) utilizando una comparación de prueba Tukey con un nivel de confianza del 95%.

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

El efecto de cinco variedades de maíz sobre los atributos sensoriales de la bebida tradicional chiapaneca llamada tascalate (Figura 1a) se estudio. Cada empresa elaboró con su propia receta cinco versiones de la bebida con los cinco tipos diferentes de maíz mas una versión elaborada con el maíz de su propio proveedor (Figura 1 b y c).



**Figura 1.** Bebida tradicional chiapaneca tascalate. a. Forma tradicional de consumo; b. Polvo de tasca late elaborado por las cinco empresas; c. Variedades de maíz utilizadas en el estudio.

El análisis de las propiedades del maíz utilizadas en la preparación de las diferentes versiones de los polvos de tasca late se presentan en la Tabla 1. Variedades de maíz presentaron entre uno y 5% de impurezas y tuvieron una humedad relativa entre 5.29 y 5.63%. De acuerdo en los resultados obtenidos del color de las variedades de maíz hubieron variaciones en el color.


**Tabla 1** Propiedades del maíz (*Zea mays*) empleado para la preparación de tascalate.

Tipo de maíz	Tamaño de largo y ancho del grano (cm)	Pureza (%)	pH	Humedad (%)	Color		
					L*	a*	b*
VSA	0.9 * 0.5	95	6.22 (±0.12)	5.31 (±0.54)	67.40	-5.71	33.52
PAS5	0.7* 0.8	98	6.12 (±0.11)	5.35 (±0.62)	67.75	-5.96	28.86
VS5	1.0 * 0.6	96	6.12 (±0.18)	5.63 (±0.47)	67.97	-5.01	23.57
V4	0.7 * 0.8	96	6.13 (±0.12)	5.29 (±0.25)	67.09	-6.70	23.69
PAS1	0.9 * 0.7	99	6.29 (±0.21)	5.36 (±0.44)	68.11	-5.67	24.11

Con un total de n=120 jueces no entrenados que participaron en este estudio se evaluaron los atributos de la bebida preparada de tasca late mediante una escala hedónica (Figura 2). El estudio se llevó a cabo en un parque deportivo de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez, con el fin de que los jueces tuvieran algún interés en el consumo de bebidas tradicionales sin azúcar. Los niveles de aceptación de las bebidas de tasca late se presenta en la Tabla 2. Con un total de n=120 jueces no entrenados que participaron en este estudio se evaluaron los atributos de la bebida preparada de tasca late mediante una escala hedónica.



Los resultados demuestran que el nivel de aceptación de todas las bebidas fue de indiferente me gusta, esto probablemente porque la bebida no contenía azúcar. Sin embargo la, la aceptación de la bebida fue aceptable para el grupo de personas que participaron en la prueba.

El tipo de maíz influyó en forma diferente para cada una de las propiedades sensoriales evaluadas, es decir que el tipo de maíz varía en forma diferente al sabor comparado con el efecto que tiene el tipo de maíz sobre la textura. Debido a que cada una de las empresas preparó el polvo de tasca late de acuerdo a su propia fórmula no, no es posible comparar el efecto de una sola variedad de maíz sobre todas las versiones del polvo de tascalate.



**Figura 1.** Evaluación sensorial de bebida preparada de tascalate.


**Tabla 2.** Nivel de aceptación de las bebidas de tascalate.

Marca	Parámetro	Tipo de maíz	Nivel de aceptación
A	color	MA	3.35 ( $\pm 1.169$ )
	olor	PAS1	3.45 ( $\pm 1.070$ )
	sabor	PAS1	3.15 ( $\pm 1.384$ )
	textura	PAS1	3.25 ( $\pm 1.147$ )
	apariencia	V4	3.33 ( $\pm 0.820$ )
B	color	VSA	3.55 ( $\pm 0.964$ )
	olor	VSA	3.55 ( $\pm 1.020$ )
	sabor	VS5	3.2 ( $\pm 1.167$ )
	textura	PAS1	3.10 ( $\pm 1.290$ )
	apariencia	PAS1	3.45 ( $\pm 1.070$ )
C	color	MC	2.65 ( $\pm 0.955$ )
	olor	PAS5	3.10 ( $\pm 1.118$ )
	sabor	MC	2.8 ( $\pm 1.100$ )
	textura	V4	3.25 ( $\pm 1.228$ )
	apariencia	MC	2.90 ( $\pm 0.809$ )
D	color	V4	3.15 ( $\pm 1.169$ )
	olor	MD	2.50 ( $\pm 1.073$ )
	sabor	MD	1.80 ( $\pm 0.928$ )
	textura	MD	2.40 ( $\pm 1.304$ )
	apariencia	MD	2.85 ( $\pm 0.936$ )
E	color	ME	3.50 ( $\pm 0.961$ )
	olor	PAS5	3.30 ( $\pm 0.830$ )
	sabor	ME	3.4 ( $\pm 1.073$ )
	textura	ME	3.25 ( $\pm 0.885$ )
	apariencia	ME	3.50 ( $\pm 0.671$ )

**MA:** maíz utilizado en la empresa A; **MC:** maíz utilizado en la empresa C;

**MD:** maíz utilizado en la empresa D;

**ME:** maíz utilizado en la empresa E.



## CONCLUSIONES

Los cambios en las tendencias de consumo de los chiapanecos pudieran estar cambiando hacia el consumo de bebidas carbonatadas.

El consumo de bebidas tradicionales a base de maíz es un acervo cultural importante para el estado de Chiapas. Los esfuerzos que se hacen en las diferentes empresas para ofrecer bebidas tradicionales. El tascalate ofrece ser una bebida que además de tener un componente cultural asociado puede contar con un valor nutritivo importante. En este estudio se valoró el efecto que tuvieron diferentes variedades de maíz sobre el sabor, olor, color, textura y apariencia del tascalate. La variedad de maíz utilizada para preparar el polvo influye sobre cada una de las propiedades sensoriales de la bebida en forma diferenciada.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración del Ayuntamiento de la ciudad de Tuxtla Gutiérrez a través de la Secretaría de Economía y la Dirección de Fomento Económico por el apoyo brindado para la realización de este trabajo. Así mismo se agradece a los cinco empresarios que colaboran en la tienda social “Punto Tuxtleco” por la logística para realizar el trabajo.



## REFERENCIAS

- [1] J. (Long T. Long and Universidad Nacional Autónoma de México. Instituto de Investigaciones Históricas., *Conquista y comida : consecuencias del encuentro de dos mundos*. Universidad Nacional Autónoma de México, 1996.
- [2] “UNESCO” Traditional Mexican Cuisine-Ancestral, Ongoing Community Culture, the Michoacan Paradigm: Nomination File No. 00400 for Inscription on the Representative List of the Intangible Cultural Heritage in 2010. [English] [Online: United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization]. Available online: <https://ich.unesco.org/en/RL/traditional-mexican-cuisine-ancestral-ongoing-community-culturethe-michoacan-paradigm-00400> (accessed on 20 June 2019).
- [3] E. Arnés and M. Astier, “Handmade comal tortillas in michoacán: Traditional practices along the rural-urban gradient,” *Int J Environ Res Public Health*, vol. 16, no. 17, Sep. 2019, doi: 10.3390/ijerph16173211.
- [4] G. N. Murray-Tortarolo, V. J. Jaramillo, and J. Larsen, “Food security and climate change: the case of rainfed maize production in Mexico,” *Agric For Meteorol*, vol. 253–254, pp. 124–131, May 2018, doi: 10.1016/j.agrformet.2018.02.011.
- [5] L. Jorge Corzo-Rios, M. A. Aguilar-Méndez, and M. Eugenia Ramírez Ortiz, “Water Adsorption Isotherms for Tascalate, A Powder Employed To Make A Traditional Beverage Of Chiapas, México.” [Online]. Available: <https://www.researchgate.net/publication/308691054>
- [6] Secretaría de Economía, “NMX-F-317-S-1978 Determinación de pH en alimentos.”
- [7] Secretaría de Economía, “NOM-116-SSA1-1994 Determinación de humedad en alimentos por tratamiento térmico. Método por arena o gasa.”.
- [8] H. T. Lawless and H. Heymann, “Principles of Good Practice,” in *Sensory evaluation of food: principles and practices*, H. T. Lawless and H. Heymann, Eds., New York: Elsevier, 2010, pp. 19–56.



## Gemelo digital para diagnóstico de fugas

<sup>1</sup>Gómez-Coronel, L., De los Santos-Ruiz, I. & López-Estrada, F.-R.

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, I. T. Tuxtla Gutiérrez, Grupo de Diagnóstico y Control TURIX-Dynamics, Carretera Panamericana S/N, Tuxtla Gutiérrez C.P.

29050, México

\*Autor para correspondencia: [ildeberto.dr@tuxtla.tecnm.mx](mailto:ildeberto.dr@tuxtla.tecnm.mx)

### RESUMEN

En esta investigación se diseñó un sistema que virtualiza la operación de un sistema hidráulico experimental con aplicación de diagnóstico de fugas. El sistema que se diseñó recibe el nombre de “gemelo digital”. El sistema diseñado permite el control remoto de la planta desde microcontroladores embebidos en subsistemas de control que regulan la apertura y cierre de electroválvulas y el encendido, apagado y regulación de la potencia de la bomba principal de alimentación. Las mediciones de los sensores (de presión y caudal) instalados en el sistema son enviadas a la nube y se reciben en línea en una interfaz que virtualiza la operación del sistema y desde la que se ejecuta el algoritmo del diagnóstico de la fuga. El sistema desarrollado demostró resultados satisfactorios en el diagnóstico de eventos de fugas simples y múltiples.

**Palabras clave:** Diagnostico de fugas, leak diagnosis, gemelo digital, digital twin, agua, water, sistemas ciber-físicos, cyber-physical systems, sistemas inteligentes, intelligent systems.



## INTRODUCCIÓN

El agua es el recurso natural con una importancia inconmensurable ya que es la base de todas las formas de vida en nuestro planeta. Es requerida en prácticamente todas las actividades sociales y productivas desempeñadas por el ser humano, desde el comienzo de la historia la disponibilidad de este fluido ha sido un factor crítico en la manera en que las sociedades se distribuyen y asientan geográficamente. A pesar de que, en su mayoría, nuestro planeta se encuentra cubierto de agua, un porcentaje pequeño de esta total resulta apto para su uso y consumo en las actividades humanas.

De acuerdo a cifras proporcionadas por iAgua [1], el 70% del planeta se encuentra cubierto de agua, sin embargo, el 96.5% de esta agua es salada y se encuentra distribuida en los océanos y del 3.5% restante correspondiente al agua dulce, aproximadamente el 70% se encuentra en forma congelada en los glaciares, menos del 30% se encuentra en forma de humedad en el suelo o acuíferos, un porcentaje incluso menor al 1% la encontramos en cuencas hidrográficas, ríos y arroyos y finalmente, un porcentaje cercano al 0.025% es agua potable y apta para consumo humano. El hecho de que el porcentaje de agua que se encuentra disponible para las actividades desarrolladas por el ser humano sea una cantidad ínfima resalta la importancia de asegurar una buena gestión de este fluido.

Todas las comunidades y gobiernos alrededor del mundo se enfrentan al desafío de asegurar que la administración, transporte y distribución del agua se lleve a cabo de la mejor forma posible. Para este propósito se suelen emplear redes de tuberías. Las redes de distribución empleadas para el transporte de este fluido hasta los consumidores suelen ser sistemas grandes y complejos que se encuentran expuestas a factores que provocan fugas: la exposición ambiental provoca desgaste sobre el material con el que se encuentra construida la tubería (generalmente óxido, corrosión u otros factores relacionados con la exposición a la intemperie como se muestra en la Figura 1), y es posible que residuos sólidos en suspensión en el agua



transportada se acumulen en forma de sarro las paredes internas de la tubería (como se ejemplifica en la Figura 2). A la larga, ambos factores provocan que las paredes de la tubería se debiliten y ocurra una fuga.



**Figura 1.** Tubería dañada por exposición ambiental.



**Figura 2.** Sección transversal de una tubería con acumulación de sarro.

Una fuga es definida como una pérdida de fluido no deseada que tenga lugar desde alguno de los elementos de un sistema hidráulico y tiene consecuencias graves que van desde el impacto ambiental relacionado con el desperdicio y pérdidas económicas asociadas con el derramamiento. Los puntos anteriormente mencionados dejan en evidencia que es necesario llevar a cabo operaciones de mantenimiento constantes sobre estos sistemas para mantenerlos en estado óptimo y prevenir al máximo posible la ocurrencia de estas fugas.



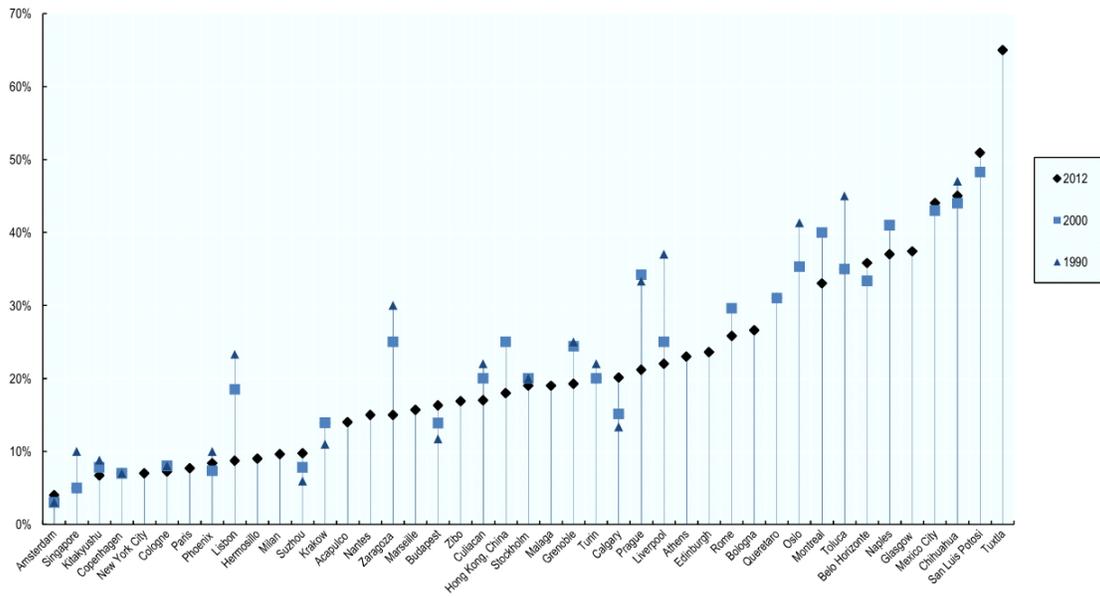
A pesar de que estos cuidados mantienen en un estado óptimo la infraestructura encargada del transporte del agua, existen otros factores que provocan fugas en los sistemas hidráulicos que son muy difíciles (o incluso imposibles) de prevenir a través de operaciones de mantenimiento correctivo y preventivo. Entre estos ejemplos encontramos el conocido como *efecto del golpe de ariete* que se trata de una onda de presión a alta velocidad que ocurre a causa de acumulaciones de aire al interior de las tuberías y que provoca sobrepresiones de hasta 60 a 100 veces la presión nominal al interior de la tubería y que provoca daños y fisuras severos en los elementos de unión y accesorios.

Otro factor perjudicial que provoca pérdidas no deseadas de fluido en sistemas hidráulicos se trata de la existencia de tomas clandestinas para el robo del fluido. Esta problemática no es exclusiva al tema del agua, puesto que otras redes de tuberías empleadas para el transporte de hidrocarburos como gasolina también se encuentran sujetas a las mismas condiciones adversas que provocan fugas no deseadas; tanto las provocadas por factores ambientales como las ocasionadas por el ser humano, como el caso del *huachicoleo*, que se trata de una problemática común en algunas zonas de nuestro país y que consiste en realizar tomas clandestinas en los ductos de distribución de hidrocarburos (principalmente gasolina) para su robo y reventa. Además de ser una actividad ilegal, existe un factor de riesgo muy alto involucrado en el desarrollo de esta actividad, como se aprecia en el caso de la explosión de Tlahuelilpan en enero del 2019 durante una perforación ilegal en una tubería que transportaba gasolina. Esta explosión dejó un saldo inicial de 73 muertos y 74 heridos, aunque posteriormente la cifra de decesos se incrementó hasta 137 a causa de la gravedad de las quemaduras de los lesionados.

Poniendo en contexto en cifras la problemática mencionada, el trabajo de Romano y Akhmouch (2019) [2] indica que a nivel global las pérdidas volumétricas de agua para consumo humano a causa de fugas en redes de distribución ascienden al 21%. Como país, México cuenta con un panorama incluso más crítico en la materia de la



gestión del agua puesto que este porcentaje se incrementa hasta aproximadamente el 40%. La Organización para la Cooperación y el Desarrollo Económicos (OCDE) realizó una encuesta en 2016 (OCDE, 2016) en 42 ciudades en distintos países que presentan el mayor problema en materia de fugas en redes de distribución. De esta encuesta (ver Figura 3), encontramos a Tuxtla Gutiérrez con una pérdida de caudal del 70%, San Luis Potosí con el 50% y la Ciudad de México con más del 40% [6].



**Figura 3.** Pérdidas volumétricas de agua en algunas ciudades de acuerdo a la encuesta de la OCDE.

Es importante mencionar que generalmente, los sistemas de tuberías se distribuyen en su mayoría de forma subterránea, lo que dificulta (e incluso en ocasiones imposibilita) la identificación visual de los eventos de fuga, pues el fluido se derrama y absorbe en el subsuelo. En estos casos, contar con un conocimiento completo de las variables medidas en el sistema (caudal y presión al interior de la tubería) permitiría identificar condiciones de operación anómalas que se relacionen con eventos de fuga. Todo lo anteriormente mencionado deja en evidencia que resulta ampliamente deseable contar con sistemas inteligentes que realicen un monitoreo y pronóstico constante y en tiempo real de las condiciones de operación del sistema, complementado con capacidades de detección y localización en línea de fugas.



Estos *sistemas inteligentes* deberían de encontrarse integrados con tecnologías del Internet de las Cosas, sensores y actuadores conectados a internet que les permitan implementar acciones correctivas y preventivas en tiempo real.

## **EL DIAGNÓSTICO DE FUGAS**

El objetivo último del diagnóstico de fugas es identificar en la forma más precisa posible la ubicación y la magnitud de la fuga, es decir, cuantificar el caudal que se está perdiendo y localizar con alta precisión la ubicación (o ubicaciones) en la red hidráulica donde ocurre la pérdida de flujo. Se han implementado diferentes métodos para diagnosticar eventos de fuga. Por un lado, existen los métodos basados en *hardware* que requieren de equipo especializado instalado a lo largo de la tubería. Ejemplos de esto se tratan de la reflectometría acústica, la fibra óptica (ver Figura 4), entre otros métodos. Sin embargo, los métodos de diagnóstico de fugas basados en *hardware* requieren de equipo especializado instalado a lo largo de la tubería, lo que eleva el factor de costo involucrado y adicionalmente resulta poco viable para su aplicación en todos los sistemas. Por otro lado, existen los métodos de diagnóstico basados en *software*, los cuáles se basan en modelos matemáticos integrados con datos de mediciones de las variables hidráulicas proporcionadas por los sensores instalados en el sistema. El objetivo de los métodos basados en software es el de proporcionar un diagnóstico del evento de fuga minimizando al máximo la cantidad de instrumentación necesaria, de forma ideal, una fuga que ocurre en una red de distribución debe de ser detectada y localizada de la forma más rápida que sea posible. El proceso de diagnóstico de fugas consta de dos etapas principales:



**Figura 4.** Instalación de fibra óptica en un segmento de tubería para diagnóstico de fugas.

i. En primera instancia, la fuga debe de ser percibida. Esto se refiere a que la pérdida de caudal debe de ser detectada de algún modo. Esto generalmente realiza por medio de ecuaciones de balance de masa o tomando mediciones del caudal que fluye al interior de la tubería en diferentes ubicaciones, y, en caso de que la fuga no sea visible al menos se debe de identificar una región preliminar en la que se tenga cierto nivel de certeza de existencia de la fuga si no se cumple el balance de caudales. En concordancia con lo que se mencionó anteriormente, las fugas que tienen el mayor tiempo de vida son las que ocurren de forma subterránea.

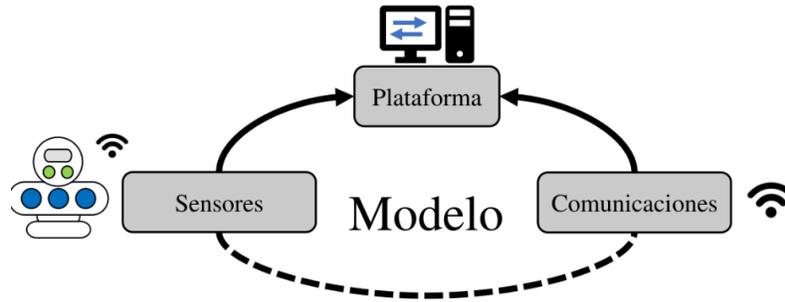
ii. En segunda instancia, la fuga debe de ser localizada de la forma más precisa que sea posible. Para esta etapa, de igual modo se emplean métodos que son conocidos como de *pre-localización* cuyo objetivo es el de aislar una región que contenga nodos que sean cercanos al evento de fuga. La identificación de esta región preliminar es importante de igual modo pues proporciona a los operadores del sistema información valiosa para identificar más rápidamente la ubicación concreta de la falla.



Como resulta evidente, todo el proceso de diagnóstico de una fuga no es trivial y existen algunas limitantes tecnológicas durante este proceso, como resulta evidente al comparar la cantidad elevada de posiciones (o combinaciones de posiciones) en las que existe posibilidad de encontrar la fuga al compararlo con la cantidad de sensores instalados. En forma similar, existe incertidumbre y ruido en las mediciones de los sensores al igual que transitorios no predecibles que impacten de forma negativa en la precisión de las mediciones disponibles. Otra limitante se trata del tamaño y configuración de los sistemas hidráulicos, pues es posible que estos se extiendan a lo largo de varios kilómetros sobre todo en el entorno urbano. Todas estas dificultades han provocado que no exista una respuesta absoluta y se continúen desarrollando investigaciones en esta área.

## **GEMELOS DIGITALES Y SU APLICACIÓN A SISTEMAS HIDRÁULICOS**

En los últimos años se ha experimentado un crecimiento incremental en el desarrollo e innovación de sistemas inteligentes que integren la interacción entre el entorno físico y el virtual. El crecimiento de tecnologías como el Internet de las Cosas (o IoT, como es conocido por sus siglas en inglés), el conocido como “Internet Industrial”, la nueva industria 4.0, las mejoras constantes en materia de tecnologías de telecomunicaciones, sensores y actuadores inteligentes, entre otros, son algunos ejemplos de los sistemas gracias a los que se ha experimentado un crecimiento e implementación de más y mejores sistemas que permitan la interacción entre el entorno físico y su contraparte virtualizada. Con la intención de brindar una respuesta óptima y oportuna a escenarios adversos en diferentes sistemas industriales (y en particular, de los sistemas hidráulicos como es el caso de estudio en esta investigación), se han desarrollado avances en materia de una gestión inteligente e informada del agua, basada en un monitoreo en baja latencia de datos proporcionados por sensores, particularmente para brindar respuestas oportunas a escenarios adversos (como se podría tratar de eventos de fuga). Este nuevo paradigma ha dado origen al concepto conocido como el *gemelo digital*, en donde los principales elementos que constituyen a este sistema son los que se muestran en la Figura 5.



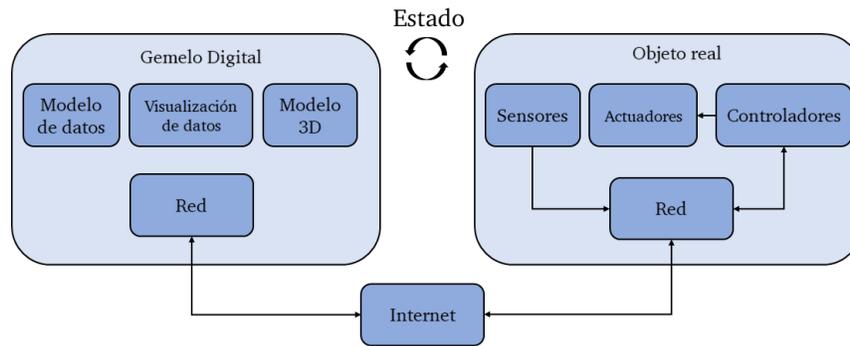
**Figura 5.** Principales componentes que interactúan en el gemelo digital.

El concepto del gemelo digital es relativamente nuevo tanto en el entorno académico como en el industrial y ha sido definido y tratado por múltiples autores. Las siguientes definiciones muestran en mayor profundidad la manera en que los elementos que se muestran en la Figura 3 interactúan entre sí:

- Para Schroeder *et al.*, (2016) el gemelo digital se define como un elemento que forma parte de un sistema ciber-físico, en el que entidades físicas interactúan con un espacio virtual a través de una red de comunicación adecuada. En esta definición, el término “ciber-físico” hace referencia a que los elementos que conforman al sistema se encuentran tanto en el mundo real como en el mundo digital [3].
- Según Moro (2020), el gemelo digital se trata de un modelo virtual interactivo e idéntico de un proceso o de un producto, en el cual se implementan diferentes sensores en un objeto, se mide cada uno de sus parámetros y se replican de forma virtual. En este modelo se monitorea el objeto a través de su réplica virtual pues esta contiene toda la información del sistema físico. Gracias a integrar tecnologías relacionadas con el Internet de las Cosas, el gemelo digital es mucho más que una simple copia digital o un modelo de simulación, ya que es posible interactuar con el modelo virtual y que los cambios implementados se reflejen en el sistema real [4]. De acuerdo al modelo propuesto por Moro (ver Figura 6), los sensores, actuadores y controladores instalados en el objeto real se encuentran conectados en una red de comunicación con las interfases virtuales del gemelo digital, típicamente a través de una conexión a internet. Por otro lado, el modelo virtualizado del gemelo digital

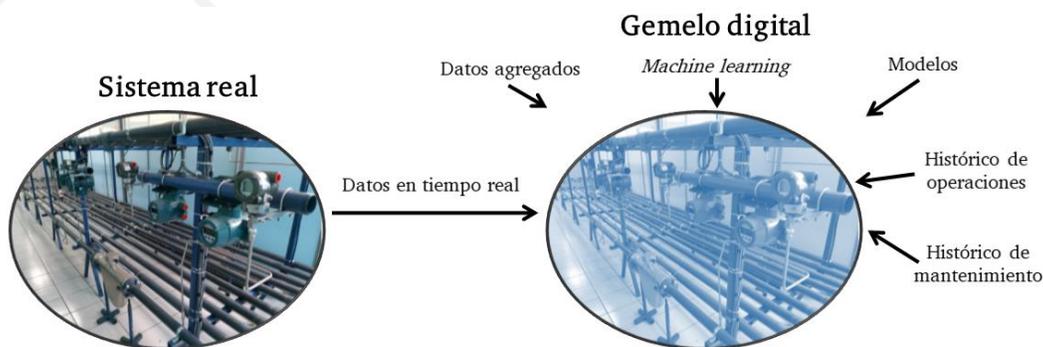


se alimenta y complementa con modelos de software, elementos de inteligencia artificial, y mediciones desde el sistema físico.



**Figura 6.** Elementos que integran al gemelo digital en el modelo propuesto por Moro (2020).

En este contexto, el gemelo digital se interpreta como un sistema “específico hasta el número de serie” y “hecho como un traje a la medida” para un sistema en concreto. Incluso si se cuenta con dos activos físicos idénticos que tienen los mismos componentes y fueron manufacturados de igual manera, los gemelos digitales de ambos sistemas se encontrarán ajustados de manera diferente debido al cambio en condiciones operativas que ambos activos han visto desde el día que se pusieron en servicio. Un gemelo digital representa de la forma más fiel que sea posible la realidad de un sistema físico específico y lo complementa por medio de simulaciones, elementos de inteligencia artificial y modelos de software de su contraparte física. Los elementos que complementan al sistema real en su gemelo digital se muestran en la Figura 7.



**Figura 7.** Los elementos que complementan al sistema físico en un gemelo digital.



## CASO DE ESTUDIO: PLANTA PILOTO EXPERIMENTAL TURIX-ITTG

El proyecto que se desarrolló consistió en el desarrollo de un gemelo digital de un sistema hidráulico con aplicación de diagnóstico de fugas. Para la implementación práctica, el proyecto se aplicó sobre la planta piloto del Laboratorio de Hidroinformática TURIX-ITTG del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez, la cual se trata de un sistema hidráulico orientado a propósitos experimentales de prueba y validación de algoritmos de diagnóstico y control de redes de distribución de tamaño completo (ver Figura 8).



**Figura 8.** Planta piloto del Laboratorio de Hidroinformática del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.

Este sistema se encuentra equipado con medidores de grado industrial de presión, de caudal y electroválvulas instaladas en diferentes puntos del sistema para simular la ocurrencia de fugas en estas ubicaciones. El sistema es reconfigurable de una tubería simple a una red con dos ramificaciones. La Figura 9 muestra el diagrama de tubería e instrumentación del sistema hidráulico. Se cuenta con un modelo calibrado de la planta piloto que opera desde el simulador hidráulico EPANET interfasándolo con MATLAB mediante un *toolkit* que importa las funciones de simulación hidráulica en un entorno de código (MATLAB-EPANET Toolkit).



La metodología y resultados de la etapa de calibración del modelo se muestran en Gómez-Coronel *et al.*, (2022) [5]. La Figura 10 muestra la comparación entre las presiones físicamente medidas y estimadas por el modelo calibrado.

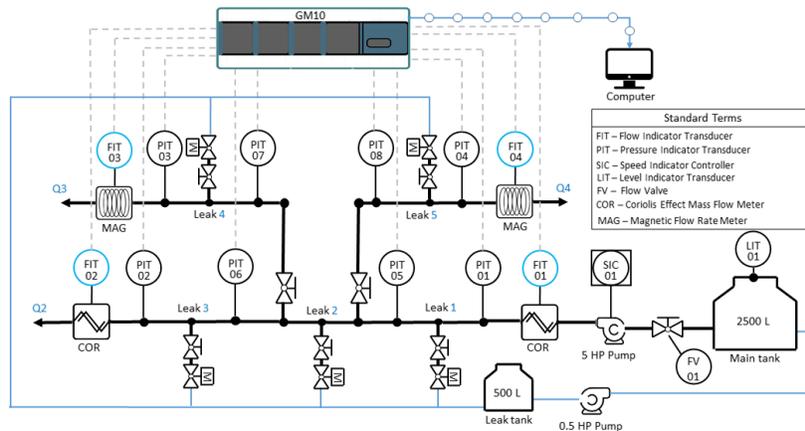


Figura 9. Diagrama de tubería e instrumentación de la planta piloto.

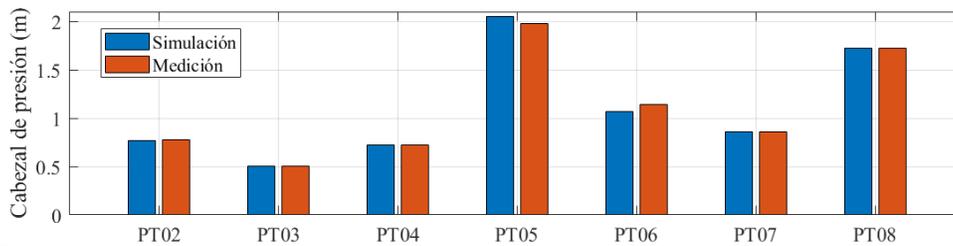
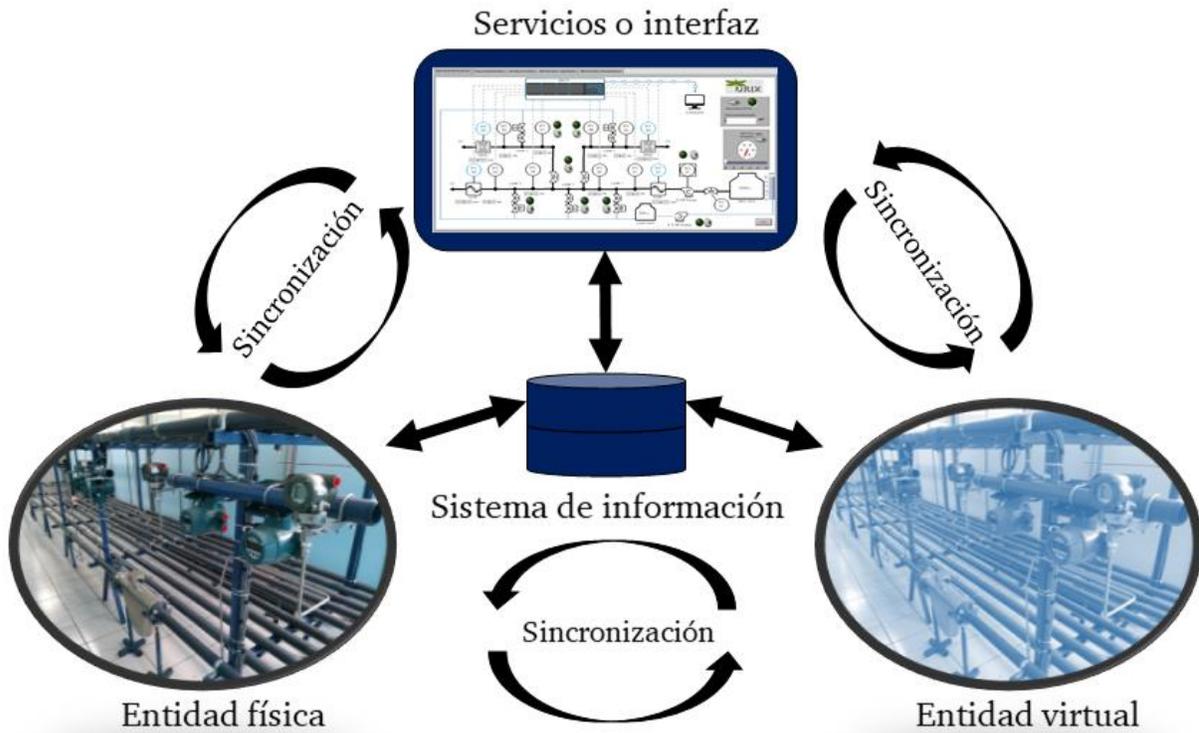


Figura 10. Comparación entre el cabezal de presión medido por el modelo.

## RESULTADOS EXPERIMENTALES

En este proyecto se creó un sistema que engloba a la entidad física (en forma de las mediciones de los sensores que se encuentran físicamente instalados en el sistema), la entidad virtualizada y a una interfaz de servicios que integra y conecta a ambos sistemas para su interacción remota y donde existe un estado constante de sincronización todos los elementos del sistema. De este modo que es posible desempeñar tareas de monitoreo, diagnóstico de fugas y adquisición de datos de forma remota. En forma esquemática, el sistema diseñado se muestra en la Figura 11.



**Figura 11.** Los elementos que integran al sistema diseñado.

Contando con un modelo calibrado de la planta piloto, la siguiente etapa del proyecto consistió en la implementación de los entornos virtualizados donde se desempeñarán las labores del gemelo digital. Con este propósito se desarrollaron dos interfaces virtuales:

- Una *interfaz de operador* (implementada en LabVIEW) orientada principalmente al desempeño de las actividades de monitoreo, control y adquisición de datos de forma remota (ver Figura 12).

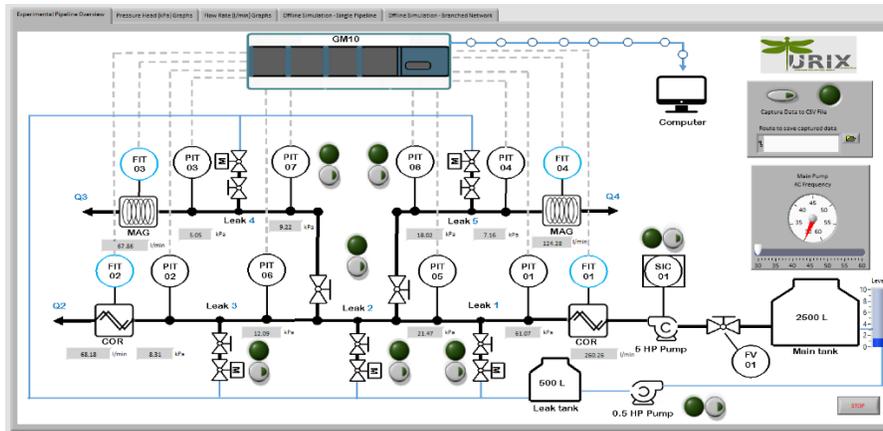


Figura 12. Interfaz de operador del gemelo digital.

- Una *interfaz de diagnóstico* (implementada en MATLAB) desde donde se reciben en línea las mediciones de los sensores instalados en el sistema, y se ejecuta el algoritmo de diagnóstico de la fuga (ver Figura 13).

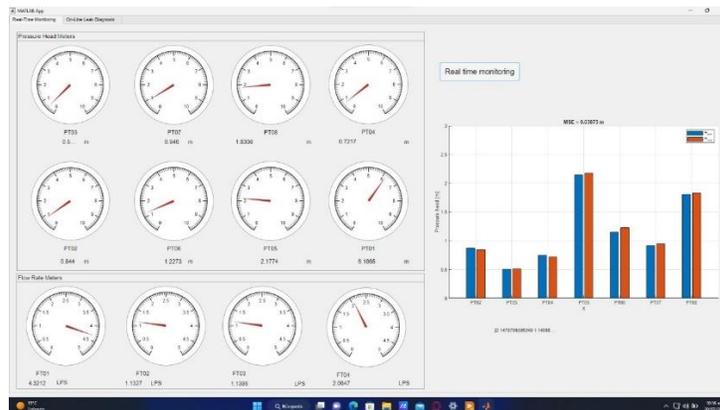
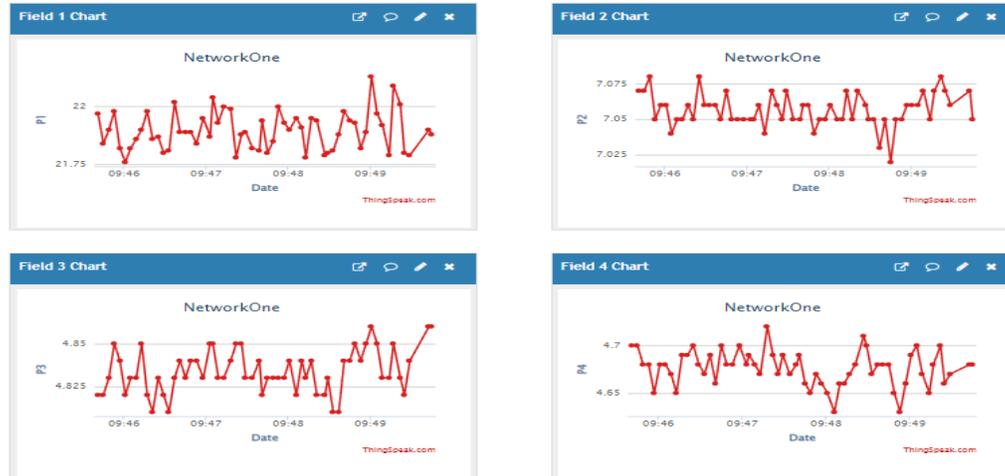


Figura 13. Interfaz de diagnóstico del gemelo digital.

La interfaz de diagnóstico recibe en tiempo real las mediciones de presión y caudal que son enviados desde el sistema de adquisición de datos del sistema (por medio de conexión Wi-Fi) a un entorno de nube (ver Figura 14) en donde se encuentran disponibles para su consulta y descarga por parte del gemelo digital. El acceso a este entorno de nube requiere únicamente de una conexión a internet.



**Figura 14.** Entorno de nube para el monitoreo/adquisición de datos de forma remota.

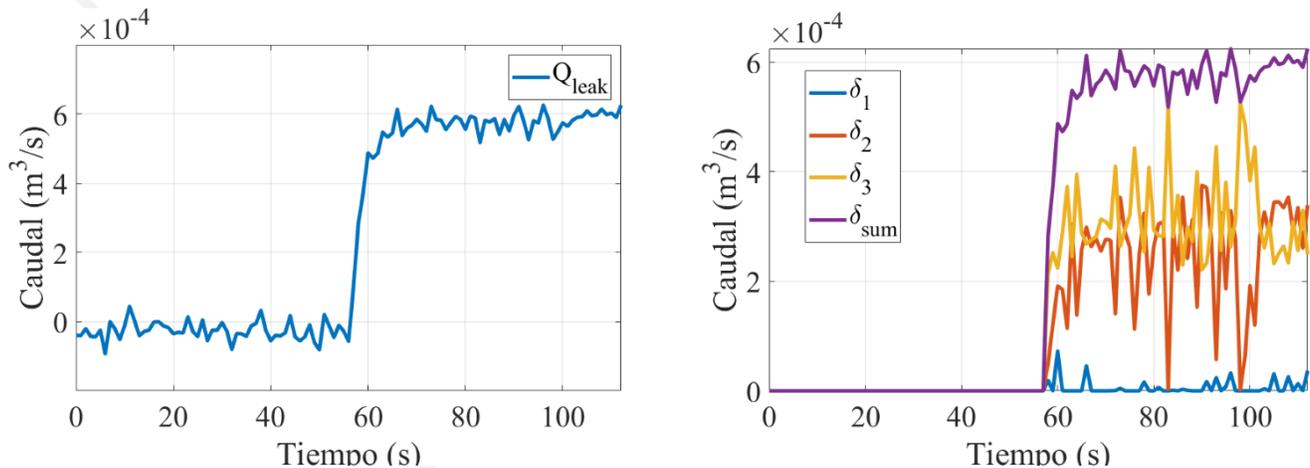
La interfaz de operador integra de igual modo controles remotos para los actuadores del sistema (electroválvulas y la bomba principal de alimentación), lo que permite inducir cambios en el proceso como la puesta en marcha del sistema, la regulación del punto de operación de la bomba, inducir de forma remota una fuga para propósitos experimentales e incluso detener la operación del mismo.

La metodología que se propuso para el diagnóstico de la fuga se basa en una búsqueda óptima de los parámetros de fuga que minimizan el error entre los cabezales de presión medidos y estimados por el modelo después de la ocurrencia de la fuga. Cuando una fuga tiene lugar, se experimenta un desajuste entre las presiones medidas y estimadas debido a que la simulación hidráulica se realiza alimentando al modelo calibrado los valores del cabezal de presión a la entrada del sistema (el entregado por la bomba) y los consumos en los nodos de salida. En condiciones estables de operación, el ajuste es como se muestra en la Figura 6. Sin embargo, tras la ocurrencia de un evento de fuga estos valores cambian (el cabezal de presión y los caudales a la salida experimentan una caída) y entonces ocurre un desajuste entre los valores medidos y estimados pues el modelo calibrado del gemelo digital no tiene conocimiento sobre un caudal de fuga en uno o varios nodos que en este momento son desconocidos.



El objetivo del diagnóstico es buscar valores óptimos de caudal de fuga en una combinación de nodos que sean identificados como candidatos de presentar la fuga. La Figura 15 muestra los resultados de una prueba de diagnóstico de fugas múltiples en la que las variables hidráulicas medidas eran alimentadas en tiempo real a la interfaz de diagnóstico que integra el modelo calibrado y el algoritmo propuesto.

En esta prueba, dos fugas en los nodos “2” y “3” en el sistema hidráulico, mientras que el nodo “1” era libre de fuga. La gráfica a la derecha muestra el caudal de fuga que es estimado por el algoritmo de diagnóstico en donde la línea azul representa el caudal perdido por el nodo “1”, la naranja el caudal fugado por el nodo “2” y la amarilla por el nodo “3”, demostrando cómo se identificó correctamente los nodos en los que ocurre la pérdida de caudal y la magnitud con que esta ocurre. Mediante esta y otras pruebas a diferentes puntos de operación se confirmó experimentalmente que el gemelo digital es capaz de diagnosticar correctamente eventos de fugas simples y múltiples.



**Figura 15.** Resultados experimentales para el escenario



## CONCLUSIONES

En este trabajo se virtualizó la operación de un sistema hidráulico experimental con aplicación de diagnóstico de fugas de forma remota. El sistema diseñado permite el control remoto de la planta, así como la adquisición de datos desde una interfaz virtual que se ejecuta en línea, integrando las mediciones de los sensores, un modelo calibrado para simulación del sistema hidráulico y el algoritmo de diagnóstico de las fugas. Se probó el desempeño de un método de diagnóstico de fugas basado en el algoritmo genético que demostró ser capaz de identificar con un tiempo de respuesta aceptable para implementaciones prácticas los parámetros de la fuga, calculando de forma correcta el caudal de fuga perdido y las posiciones reales de los nodos con falla.



## REFERENCIAS

[1] iAgua, ¿Sabías que solo el 0,025% del agua de la Tierra es potable?, Disponible en línea: <https://www.iagua.es/noticias/fundacion-aquae/sabias-que-solo-0025-agua-tierra-es-potable-infografia-fundacion-aquae>

[2] Romano, O., & Akhmouch, A. (2019). Water governance in cities: current trends and future challenges. *Water*, 11(3), 500.

[3] Schroeder, G. N., Steinmetz, C., Pereira, C. E., & Espindola, D. B. (2016). Digital twin data modeling with automationml and a communication methodology for data exchange. *IFAC-PapersOnLine*, 49(30), 12-17.

[4] Moro García, C. (2020). Desarrollo de un framework para la creación de gemelos digitales usando IoT.

[5] Gómez-Coronel, L., Santos-Ruiz, I., Torres, L., López-Estrada, F. & Delgado-Aguiñaga, J. Model Calibration for a Hydraulic Network Using Genetic Algorithms. *Memorias del Congreso Nacional de Control Automático*, pp. 146-151, 2022. <https://doi.org/10.58571/CNCA.AMCA.2022.015>

[6] Romano, O., & Akhmouch, A. (2019). Water governance in cities: current trends and future challenges. *Water*, 11(3), 500.



## Sensibilidad de agentes causales de infecciones intestinales a extractos orgánicos de *Justicia spicigera*

Cruz-Rodríguez, Rosa I. <sup>1\*</sup>; Castillo-Valencia, Román<sup>2</sup>; Maldonado-Fernández, Alisa P.<sup>2</sup>; Porraz-Ruiz, María L.<sup>1</sup>; Gómez-Salinas, Jorge A.<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Tecnológico Nacional de México, Campus Tuxtla. Carretera Panamericana Km. 1080, Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México, C.P. 29050.

<sup>2</sup>Escuela de Ciencias Químicas, Universidad Autónoma de Chiapas, Ocozocoautla de Espinosa, Mexico, C.P. 29140.

[\\*rosa.cr@tuxtla.tecnm.mx](mailto:rosa.cr@tuxtla.tecnm.mx)

### RESUMEN

Se realizó el análisis del efecto antibacteriano de extractos orgánicos de *Justicia spicigera* sobre bacterias que provocan infecciones intestinales. La preparación de los extractos se llevó a cabo por sonicación y posterior filtración. Se utilizó la técnica de kirby-Bauer con discos de papel filtro impregnados con cada uno de los extractos de *J. spicigera*, para determinar su efecto sobre el crecimiento de las cepas: *Salmonella typhimurium*, *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa* y *Staphylococcus aureus*, las suspensiones de cada microorganismo fueron ajustadas a una concentración de  $1 \times 10^8$  UFC/mL. Además, se determinó la concentración mínima inhibitoria (CMI) por microdilución. También se llevó a cabo la identificación cualitativa de los grupos de metabolitos secundarios presentes en los extractos empleando cromatografía en capa fina (CCF) y espectrofotometría de luz visible. Las cepas *S. aureus* y *S. typhimurium* presentaron mayor efecto inhibitorio con el extracto metánolico de tallo de *J. spicigera*. La CMI más baja para todas las cepas fue de 0.7 mg/mL en presencia del extracto cetónico de tallo de *J. spicigera*. El perfil cromatográfico evidenció la presencia de alcaloides, saponinas, flavonoides, cumarinas y antraquinonas.



Se demostró que los componentes presentes en los extractos de hoja y tallo de *J spicigera* tienen actividad antibacteriana por lo que se requiere profundizar en su análisis para validar y promover su empleo en el desarrollo de nuevos productos etnofarmacéuticos

**Palabras clave:** antibacteriano, *Justicia spicigera*, fitoquímicos, infecciones gastrointestinales.

## INTRODUCCIÓN

Más de 700 mil muertes anuales se presentan cada año en el mundo debido a infecciones por bacterias resistentes a los antibióticos, lo que se ha convertido en un serio problema de salud pública mundial, que podría ocasionar 10 millones de muertes en los próximos 25 años y dejar pérdidas económicas que superarían los 100 billones de dólares para 2050 [1]. Es por esta razón que la búsqueda de nuevas sustancias capaces de ser eficaces contra estas nuevas bacterias multirresistentes se ha incrementado, y de las fuentes de nuevas sustancias más prometedoras con potencial antibacterial se encuentran las plantas que han sido una valiosa fuente de productos naturales para el mantenimiento de la salud humana, su uso en la medicina tradicional de cada región nos puede dar una idea del tipo de acción de las posibles sustancias que contienen [2-4].

El análisis de los metabolitos secundarios en las especies vegetales y la comprobación de su actividad biológica, permitirá validar su empleo terapéutico en padecimientos de origen infeccioso que afectan a la población en las comunidades donde carecen de servicios y suministros básicos para preservar la salud. Además de contribuir con conocimientos científicos que regulen el consumo de esas especies, promuevan su cultivo y conservación.



En Chiapas, existe una enorme variedad de plantas a las cuales se les atribuye propiedades medicinales, sin embargo, en su mayoría se desconoce cuáles son los componentes que las constituyen, por lo mismo su uso es reservado; en la actualidad ha incrementado las investigaciones sobre plantas usadas en la medicina tradicional con el fin de emplearlas adecuadamente en terapias alternativas que beneficien a la población.

Por ello, se ha incrementado el interés por conocer más sobre los productos naturales sintetizados en las plantas y su responsabilidad en aquellas propiedades tan apreciadas en el área médica. Uno de los grupos de compuestos secundarios con enormes beneficios y amplia variedad de funciones, no solo en la planta que los genera sino en el organismo que los consume, son los flavonoides; la principal propiedad biológica de éstos es su efecto antioxidante, razón por la cual han adquirido notoriedad pública respecto a la diversidad de actividades biológicas que llevan a cabo dentro del organismo humano,

*Justicia spicigera*, también conocida como zacatinta, muicle o muitle, pertenece a la familia Acanthaceae. Es una planta originaria de México, que crece en climas cálido, semiseco, seco, templado, Se encuentra en los países de Guatemala, Honduras, El salvador, Costa Rica, Panamá, Nicaragua, Belice y Colombia. Es utilizada de manera empírica por algunas etnias de México como tónico sanguíneo, estimulante, antidisentérico, antipirético, antiespasmódico, antiinflamatorio, para aliviar trastornos menstruales, nervios, insomnio, bronquitis, desordenes intestinales incluye náuseas, diarrea y vómito, para tratar el cáncer e infecciones renales para clarificar la sangre, la erisipela, sífilis, tumores o grano y contra la presión arterial [5].

Existe una amplia variedad de bacterias patógenas que afectan al ser humano, dentro las cuales se encuentran: *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella typhimurium*. Estos microorganismos pueden



ser el agente etiológico de infecciones que comprometen la salud, siendo las infecciones gastrointestinales una de ellas, de las cuales los síntomas más comunes suelen ser: diarrea, vómitos, fiebre, dolor abdominal, malestar general, pérdida del apetito y deshidratación [6]. Esta infección causa una alta morbilidad en todo el mundo, aunque su incidencia es más alta en los países en vías de desarrollo. El objetivo de este estudio fue evaluar la actividad antibacteriana de extractos orgánicos de *Justicia spicigera* sobre el crecimiento de *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella typhimurium*.

## **MATERIALES Y MÉTODOS**

### **Material vegetal**

Se recolectaron muestras de hojas y tallos de *Justicia spicigera*, en la ciudad de Comitán de Domínguez, Chiapas, siendo sus coordenadas geográficas 16°15' N y 92° 08' W, y con una altitud de 1,600 msnm.

### **Obtención de extractos orgánicos de *Justicia spicigera***

Muestras de hojas y tallos se secaron a temperatura ambiente y fueron molidas. Se prepararon mezclas usando 5 g de material vegetal seco con 50 mL del solvente de extracción (metanol y acetona), cada una de las mezclas fueron colocadas en sonicación (Cole-Parmer 08855-00 -Illinois, USA) a 20°C durante 2 horas, posteriormente se filtraron para retirar los residuos vegetales y el líquido recuperado se centrifugó (Solbat J-600 -Puebla, Mexico) a 3500 rpm durante 15 minutos, los sobrenadantes se recuperaron, se midieron los volúmenes obtenidos y se almacenaron en frascos ámbar en refrigeración hasta su uso [7].

### ***Prueba de sensibilidad mediante la técnica de difusión en discos impregnados o antibiograma***

Para la evaluación de la actividad antimicrobiana de los distintos extractos de la especie vegetal en estudio, se empleó la técnica de antibiograma [8]. Se evaluaron



cuatro cepas bacterianas: *Salmonella typhimurium* ATCC 14028 (donado por CIATEJ), *Escherichia coli*, ATCC-25922 (donado por el Laboratorio Estatal de Salud Pública-Chiapas), *Pseudomona aeruginosa* y *Staphylococcus aureus* (donadas por el laboratorio de la Facultad de Medicina de la UNAM. En cajas Petri con agar Müeller-Hinton (MCD), se sembró en la superficie con un hisopo estéril una suspensión de cada microorganismo ajustada a la turbidez MacFarland de DO= 0.5 en un espectrofotómetro (HACH DR 5000 -Colorado, USA). Posteriormente, se depositaron los discos (6mmØ) impregnados con 15 µL de los extractos crudos sobre la superficie del agar inoculado. Se usaron discos con cloranfenicol a una concentración de 30 µg mL<sup>-1</sup> como testigo positivo y el disolvente del extracto como testigo negativo. Finalmente, se incubaron a 37°C (FELISA FE-132D -Ciudad de México, México) durante 24 horas y se realizaron las mediciones de los halos de inhibición [9,10].

Las pruebas se realizaron por triplicado. El diámetro de la zona de inhibición es expresado en milímetros (mm). La determinación del porcentaje del efecto inhibitorio relativo, se realizó en función al control positivo, mediante la fórmula: % Efecto inhibitorio (% EI) = (media de diámetro del halo de inhibición/diámetro del halo de inhibición del control positivo) x 100.V

### **Determinación de la Concentración Mínima inhibitoria**

Para aquellos microorganismos que mostraron mayor susceptibilidad ante los extractos crudos se determinó su concentración mínima inhibitoria (CMI) mediante el método de microdilución en caldo, empleando microplacas de 96 pocillos de fondo plano estéril [11]. La incubación de las microplacas fue a 37°C durante 24 h. Los experimentos se realizaron por triplicado.



### **Análisis fitoquímico**

Las pruebas cualitativas para la identificación de grupos de metabolitos secundarios se llevaron a cabo mediante cromatografía en capa fina (CCF), con placas de silica gel (Merck® -Ciudad de México-México) como fase estacionaria y la mezcla de cloroformo-acetona-ácido acético (9:1:0.2) como fase móvil [12]. Para las determinaciones cuantitativas se utilizó un espectrofotometro (HACH DR 5000 - Colorado, USA) y se prepararon curvas patrón a partir de soluciones estándar de quercetina, rutina y ácido gálico, de acuerdo a los métodos colorimétricos cloruro de aluminio para flavonas y flavonoles [13], 2-aminoetildifenilborato para flavonoides totales [14] y Folin Ciocalteu para fenoles totales [15] respectivamente.

### **Análisis estadístico**

Los datos obtenidos se analizaron con el software Statgraphics Centurion XIX, mediante un análisis de varianza (ANOVA) unidireccional y una prueba de rangos múltiples de Tukey para comparación de medias ( $P \leq 0.05$ ).

## **RESULTADOS Y DISCUSIÓN**

Se analizó la capacidad de inhibición de crecimiento microbiano de los extractos de tallo y hojas metanólico y acetónico de *J spicigera*, y se observó que hubo diferencia estadística significativa en los valores promedio de los halos de inhibición y el porcentaje de efecto inhibitorio como se muestra en el Cuadro 1, siendo el extracto metanólico de hojas el único que no formó halos de inhibición sobre las cepas estudiadas, de las cuales *Staphylococcus aureus* y *Salmonella typhimurium* presentaron mayor sensibilidad con un efecto inhibitorio de 36.6 y 35.6 % respectivamente, ambas con el extracto metanólico del tallo (MT) de *J spicigera*, cabe destacar que la CMI más baja para todas las cepas fue de 0.7 mg/mL y se obtuvo con el extracto cetónico de tallo (AT) de *J. spicigera*.



Debido a que los principios activos no se distribuyen de manera uniforme por toda la planta, algunos se concentran preferentemente en flores, hojas, raíces y a veces, en las semillas, frutos y corteza [16], aunado a que su contenido oscila dependiendo de factores tales como: su habitat, clima, nutrientes del suelo, estación del año, hora de la recolección así como el método de extracción, se caracterizaron los extractos crudos de *J spicigera* y el análisis de los perfiles cromatográficos mostró que hay presencia baja o ausencia de saponinas y alcaloides en el extracto metanólico de hoja (MH) que no tuvo actividad antibacteriana (Cuadro 2).

Mientras que el extracto MT evidenció la presencia abundante de flavonoides, saponinas y alcaloides, y moderada de cumarinas lo que indica una probabilidad de que la interacción de esas moléculas con la membrana celular de las bacterias sea el mecanismo de acción de la inhibición del crecimiento bacteriano. En investigaciones previas también se han reportado



**Cuadro 1.** Actividad antimicrobiana de los extractos *crudos* de *Justicia spicigera* sobre las cepas de *Staphylococcus aureus*, *Pseudomona aeruginosa*, *Salmonella typhimurium* y *Escherichia coli*.

Extractos crudos	<i>S. aureus</i>		<i>P. aeruginosa</i>		<i>S. typhimurium</i>		<i>E. coli</i>		CMI mg/mL
	HI mm	% EI	HI mm	% EI	HI mm	% EI	HI mm	% EI	
MH	NI	ND	NI	ND	NI	ND	NI	ND	ND
MT	9.67 a	51.98 a	8.1 a	46.02 a	7.33 a	40.27 a	8.2 a	47.67 a	15.53 c
AT	8.33 b	44.78 b	8.17a	46.42 a	7.08 b	38.90 b	8.12 a	47.21 a	0.7 a
AH	7.67 b	41.23 b	8.04a	45.68 a	6.87 b	37.75 b	8.5 a	49.41 a	13.86 b
<b>CL</b>	<b>18.6</b>		17.6		18.2		17.2		

Valores promedio seguidos de al menos una misma letra no son significativamente diferentes entre extractos por cada cepa estudiada a  $P \leq 0.05$  (Prueba de Tukey). M: Metanol, A: Acetona, H: Hoja, T: Tallo. CL: cloranfenicol. HI: Halo de inhibición; NI: No hubo inhibición; %EI: % Efecto inhibitorio; ND: No determinado; CMI: Concentración mínima inhibitoria.



La presencia de otras moléculas pertenecientes a compuestos fenólicos como taninos, antocianinas y fitoesteroles [17], además se han aislado moléculas de flavonoides tales como kaempferitrina y kaempferol trirhamnoside aislados de las hojas [18]. Otros compuestos aislados son el  $\beta$ -sistosterol, el 3-O-glucósido de  $\beta$ -sistosterol, la alantoina, la criptaxantina y una antocianina muy polar que presenta el comportamiento fluorescente de las infusiones de esta planta [19].

**Cuadro 2.** Análisis fitoquímico de extractos crudos de *Justicia spicigera* por cromatografía de capa fina

<b>Extractos Crudos</b>	<b>Alcaloides</b>	<b>Saponinas</b>	<b>Flavonoides</b>	<b>Cumarinas</b>	<b>Antraquinonas</b>
MH	-	+	++	+	+
MT	++	+++	++	++	+
AH	-	++	+++	+	+
AT	+	+	+++	+	+

M: Metanol, A: Acetona, H: Hoja, T: Tallo. Presencia abundante (+++), moderada (++), leve (+), nula (-) [20]

El análisis cuantitativo de compuestos fenólicos demostró que los extractos de hojas y tallos de *J spicigera* son ricos en flavonoides principalmente, siendo el extracto cetónico de hojas (AH) el que presentó mayor contenido de flavonoides totales con  $7.2 \pm 0.01 \mu\text{g}$  Eq rutina/mL demostrando con ello, una de las funciones principales de estos compuestos en las hojas, como lo es la protección ante la radiación UV.



**Cuadro 3.** Cuantificación de compuestos fenólicos en los extractos crudos de *Justicia spicigera*

Extractos crudos	Flavonas y flavonoles $\mu\text{g Eq quercetina/mL}$	Flavonoides totales $\mu\text{g Eq rutina/mL}$	Fenoles totales $\mu\text{g Eq ácido gálico/mL}$
MT	$0.3250 \pm 0.0075$ c	$0.0959 \pm 0.0035$ c	$1.2764 \pm 0.0065$ c
MH	ND	ND	ND
AT	$4.0290 \pm 0.0511$ b	$1.6902 \pm 0.0226$ b	$1.3586 \pm 0.0030$ b
AH	$4.5798 \pm 0.0416$ a	$7.1999 \pm 0.0133$ a	$2.7714 \pm 0.0270$ a

Valores promedio seguidos de al menos una misma letra no son significativamente diferentes entre extractos a  $P \leq 0.05$  (Prueba de Tukey). M: Metanol, A: Acetona, H: Hoja, T: Tallo. ND: No determinado.

Díaz-Solares et al., (2017) atribuyen al alto contenido de compuestos fenólicos en los extractos vegetales, algunas de sus propiedades farmacológicas, sobre todo las relacionadas con actividades antioxidantes y antimicrobianas. Desde el 2005 el número de estudios sobre flavonoides ha aumentado al punto de que compuestos, como la quercetina, han sido analizados varias veces y su actividad antibacteriana se ha atribuido a numerosos mecanismos [21]. Los Mecanismos de acción propuestos para flavonoles son los siguientes: inhibición de la síntesis de ácidos nucleicos, alteración de la función de la membrana citoplasmática y pared celular, inhibición del metabolismo energético e inhibición de la porina de la membrana celular [22].

## CONCLUSIONES

Los extractos de hoja y tallo de *J. spicigera* tuvieron efecto inhibitorio sobre el crecimiento de las cepas *Escherichia coli*, *Pseudomonas aeruginosa*, *Staphylococcus aureus* y *Salmonella typhimurium*. El análisis fitoquímico sugiere que la presencia de compuestos como alcaloides, saponinas y flavonoides son los responsables de la actividad antimicrobiana, no obstante se requieren de otros estudios para proporcionar información suficiente que validen su uso en terapias para disminuir los síntomas de las infecciones gastrointestinales.



## CONFLICTO DE INTERÉS

Los autores declaran no tener conflicto de interés

## REFERENCIAS

[1] Organización Mundial de la Salud. (2021, marzo 3). *La resistencia antimicrobiana pone en riesgo la salud mundial - OPS/OMS | Organización Panamericana de la Salud.* <https://www.paho.org/es/noticias/3-3-2021-resistencia-antimicrobiana-pone-riesgo-salud-mundial>

[2] Geck, M. S., Lecca, D., Marchese, G., Casu, L., Leonti, M. (2021). Ethnomedicine and neuropsychopharmacology in Mesoamerica. *Journal of Ethnopharmacology*, 278, 114243. <https://doi.org/10.1016/J.JEP.2021.114243>

[3]. Kaunda, J.S., Zhang, Y.J. (2019). The Genus Solanum: An Ethnopharmacological, Phytochemical and Biological Properties Review. *Natural products and bioprospecting*, 9(2), 77–137. <https://doi.org/10.1007/S13659-019-0201-6>

[4]. Ralte, L., Bhardwaj, U., Singh, Y.T. (2021). Traditionally used edible Solanaceae plants of Mizoram, India have high antioxidant and antimicrobial potential for effective phytopharmaceutical and nutraceutical formulations. *Heliyon*, 7(9), e07907. <https://doi.org/10.1016/J.HELIYON.2021.E07907>

[5]. Castro-Muñoz, R., León-Becerril, E., García-Depraect, O. (2022). Beyond the Exploration of Muicle (*Justicia spicigera*): Reviewing Its Biological Properties, Bioactive Molecules and Materials Chemistry. *Processes*, 10, 1035.

[6]. Rodríguez Pava, C.N., Zarate Sanabria, A.G., Sánchez Leal, L.C. (2017). Actividad antimicrobiana de cuatro variedades de plantas frente a patógenos de importancia clínica en Colombia. *NOVA*, 15 (27), 119–129.



[7]. Díaz Solares, M., Lugo Morales, Y., Fonte Carballo, L., Castro Cabrera, I., López Vigoa, O., Montejo Sierra, I.L. (2017). Evaluación de la actividad antimicrobiana de extractos frescos de hojas de *Morus alba* L. *Pastos y Forraje*, 40 (1), 43–48.

[8]. Bauer, A.W., Kirby, W.M.M., Sherris, J.C., Turck, M. (1966). Antibiotic susceptibility testing by standardized single method. *Am J Clin Pathol*; 45: 493–496.

[9]. Córdova-Guerrero, I., Aragon-Martinez, O. H., DíazRubio, L., Franco-Cabrera, S., Serafín-Higuera, N. A., Pozos-Guillén, A., Isiordia-Espinoza, M. (2016). Actividad antibacteriana y antifúngica de un extracto de *Salvia apiana* frente a microorganismos de importancia clínica. *Revista argentina de microbiología*, 48(3), 217-221

[10]. Villavicencio Coral, B.D., Sarmiento Ordóñez, J.M., Flores Regalado, C.G., Torrachi Carrasco, J.E. (2021) Efecto antibacteriano *in vitro* de extractos de *Caesalpinia spinosa* sobre cepas de *Staphylococcus aureus* resistentes a antibióticos betalactámicos. *Odontol. Sanmarquina*. 24(3), 205-214

[11]. Canche, E.C. (2019). Extraction of phenolic components from an Aloe vera (*Aloe barbadensis* Miller) crop and their potential as antimicrobials and textile dyes. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*. 14, 100168.

[12]. Wagner, H., Bladt, S., Zgainski, E.M. (1996). *Plant Drug Analysis. A Thin Layer Chromatography*. Springer-Verlag, Berlín.

[13]. Chang, C.C., Yang, M.H., Wen, H.M., Chern, J.C., (2002). Estimation of total flavonoid content in propolis by two complementary colorimetric methods, *J. Food Drug Anal.* 10:178-182.

[14]. Robertson, A., Hall, M.N. (1989). A critical investigation into the flavonost Method for Thea flavin Analysis in Black Tea, *Food Chemistry*. 34, 57-70.



- [15]. Singleton, V.L., Orthofer, R., Lamuela-Raventos, R.M. (1999). Analysis of total phenols and other oxidation substrates and antioxidants by means of folin-ciocalteu reagent, *Methods Enzymology*. 299, 152-178.
- [16]. Pandey, R.S. (2019). Evaluation of phytochemical, antimicrobial, antioxidant activity and cytotoxic potentials of *Agave americana*. *Nepal Journal of Biotechnology*, 7(1), 30-38.
- [17]. Baqueiro-Peña, I., Guerrero-Beltrán, J.A. (2017) Physicochemical and antioxidant characterization of *Justicia spicigera*. *Food Chem*. 218: 305-12
- [18]. Osuna-Torres L., Tapia-Pérez, M.E., Aguilar-Contreras, A. (2005) *Justicia spicigera* Schldl. (Acanthaceae). Plantas medicinales de la medicina tradicional Mexicana para tratar afecciones gastrointestinales. Barcelona, España, Publicaciones ediciones de la Universitat de Barcelona.
- [19]. Domínguez, X., Achenbach, H., González, C., Ferré-D' Amore. A. (1990). Estudio químico del "muñile" (*Justicia spicigera*). *Revista Química Latinoamericana*. 21, 142-143.
- [20]. Kamatenesi-Mugisha, M., Buyungo, J. P., Ogwal, P., Kasibante, A., Deng, A.L., Ogendo, J.O., Mihale, M.J. (2013). Oral acute toxicity study of selected botanical pesticide plants used by subsistence farmers around the Lake Victoria Basin. *Afr. J. Environ. Sci. Technol.* 7(3): 93-101.
- [21]. Cushnie, T.P.T., Lamb, A.J. (2011). Recent advances in understanding the antibacterial properties of flavonoids. *International journal of antimicrobial agents*, 38(2), 99–107. <https://doi.org/10.1016/J.IJANTIMICAG.2011.02.014>
- [22]. Farhadi, F., Khameneh, B., Iranshahi, M., Iranshahy, M. (2018). Antibacterial activity of flavonoids and their structure–activity relationship: An update review. *Phytotherapy Research* 33 (1), 13–40. <https://doi.org/10.1002/ptr.6208>



## **El Filtro de Kalman: Un viaje por su historia, fundamento matemático y sus aplicaciones prácticas**

*Domínguez-Zenteno, Joaquín E. <sup>1</sup>, De los Santos-Ruiz, Ildeberto <sup>1</sup>;*

*Velasco-Bermúdez, Salomón <sup>2</sup>;*

*Brindis-Velázquez, Osvaldo <sup>2</sup>; León-Orozco, Vicente <sup>1</sup>; Bermúdez-Hernández, Roberto;*

*López-Estrada, Francisco R. <sup>1\*</sup>*

*<sup>1</sup>Grupo de Diagnóstico y Control Turix Dynamics. Maestría en Ciencias en Ingeniería  
Mecatrónica. Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez.*

*<sup>2</sup>Ingeniería en Sistemas Computacionales. Instituto Tecnológico de Comitán.*

*Autor de correspondencia: [frlopez@ittg.edu.mx](mailto:frlopez@ittg.edu.mx)*

**Abstract.** El Filtro de Kalman, propuesto en 1960, se desarrolló para abordar el problema de las señales ruidosas en los sistemas proporcionando un filtrado eficaz. Utiliza un conjunto de ecuaciones matemáticas para ofrecer un cálculo computacional eficiente, apto para la estimación de estados pasados, presentes e incluso futuros. Esto se logra calculando el error medio al cuadrado y añadiendo matrices de covarianza de error. El Filtro de Kalman ha demostrado ser de gran utilidad en aplicaciones que requieren un buen control y precisión, como en la navegación por satélite, control de sistemas dinámicos, fusión de sensores en robótica, economía, entre otros. En este trabajo, se realiza una revisión histórica del Filtro de Kalman y se analizan algunos aspectos prácticos tanto para el filtrado de señales, la estimación de estados no medibles y el diagnóstico de fallas.

**Palabras clave:** Filtro de Kalman, estimación de estados, filtrado de señales.



## INTRODUCCIÓN



El desarrollo de la teoría computacional y las ciencias de la computación han sido moldeadas por numerosos científicos e ingenieros notables. Seguramente muchos han escuchado nombres como Alan Turing, Richard Stallman, Bill Gates, Ada Lovelace, entre otros; y muchos pocos, principalmente ingenieros trabajando en el área de control automático han escuchado hablar de Rudolf Kálmán (mejor conocido como Rudolf Kalman).

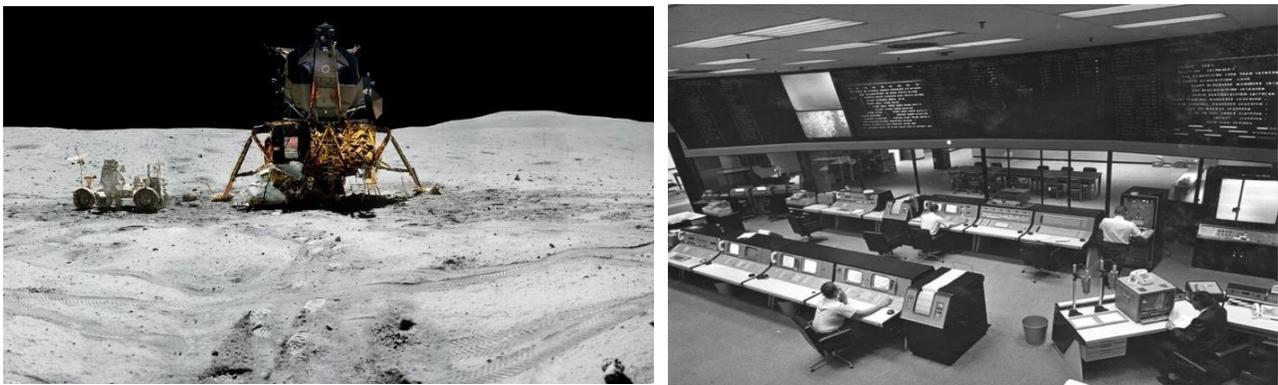
Rudolf Emir Kalman (1939-2016) fue un matemático e ingeniero eléctrico húngaro-estadounidense conocido por su trabajo llamado el Filtro de Kalman (FK), un algoritmo matemático sencillo que es utilizado en una variedad de aplicaciones de la tecnología y la ingeniería, sobre todo en donde se presentan señales con ruido como lo son sistemas de navegación, robótica, telecomunicación, computación, entre otros.

Principalmente, en los sistemas de control, donde solo se puede controlar lo que se puede medir, el filtro Kalman ha tenido numerosas aplicaciones, por lo cual lo hace una herramienta de vital importancia. La principal virtud es su capacidad para minimizar el ruido de los sensores y el proceso y hacer cálculos precisos en tiempo real, lo cual fue crucial para las misiones Apolo. Este fue el primer gran logro del FK, pues remontándose a esa época, los sistemas se contaban con una precaria red de satélites y de telecomunicaciones en general. Para lograr tal hazaña, en 1964 comenzó a operar la Red de Rastreo y Adquisición de Datos de Naves Espaciales (Spacecraft Tracking and Data Acquisition Network, STADAN), la cual fue la mayor red de telecomunicaciones mundiales y contaba con circuitos en líneas terrestres y cables submarinos, estaciones en tierra y



en barcos para garantizar el contacto en la órbita terrestre y superar el efecto de la rotación de la tierra cuando el Apolo XI estaba en la luna [1].

En este escenario, el FK tuvo un papel fundamental, ya que proporcionó una solución eficaz para estimar el estado de un sistema (en este caso, la posición y velocidad de una nave espacial) en presencia de mediciones ruidosas debido a que los datos recogidos por las antenas de rastreo contenían ruido y errores logrando manejar este ruido y obtener una estimación precisa del estado de la nave espacial.



**Figura 2.** Izquierda) Modulo de aterrizaje de apolo 11. Derecha) Sistema de comunicaciones de la NASA

Además, el FK no sólo proporciona una estimación del estado actual, sino que también puede predecir el estado futuro del sistema. Esta capacidad de predicción es particularmente útil para el seguimiento de naves espaciales en donde es importante prever la trayectoria futura de la nave espacial y planificar las operaciones de rastreo y comunicación de manera eficiente.

En el Apolo XI el FK se utilizó en la computadora de navegación de la nave espacial Apolo para estimar la trayectoria de la nave y sus velocidades, basándose en las mediciones de sensores como giroscopios, acelerómetros y radares que eran inherentemente ruidosos y estaban llenos de errores aleatorios y engorrosas imprecisiones [1]. Además, durante el alunizaje, el FK aseguró que los datos de ubicación en tiempo real procedentes del sistema terrestre de radar en la Tierra concordasen con los sensores de a bordo.



Es, por tanto, comprensible que muchos científicos e ingenieros consideran al FK como uno de los logros más importantes del siglo XX, ya que se hicieron realidad tareas que no hubiese sido posible desarrollarse sin el filtro, volviéndose una herramienta indispensable de los sistemas de cómputo y filtrado de señales al igual que los transistores lo son en el mundo de la electrónica. Actualmente, sigue siendo una herramienta muy poderosa que se utiliza en múltiples aplicaciones, por ejemplo, se usa en sistemas de navegación por satélite como en sensores GPS para mejorar la precisión de las mediciones [2], de particular importancia, por ejemplo, en situaciones donde la conexión directa con los satélites se pierde como al pasar debajo de un túnel, bueno, es el FK lo que hace posible que siga funcionando el Google Maps.

En navegación autónoma [3-4] se emplea para estimar posición y orientación de sistemas autónomos como vehículos eléctricos, naves no tripuladas, vehículos acuáticos en donde se tienen datos de sensores ruidosos. Esto es crucial para tareas como la navegación autónoma. Son ampliamente usados en ingeniería de control [5] para modelar sistemas dinámicos y diseñar controladores que optimizan el comportamiento del sistema y mejoran el desempeño de los mismos. Se aplica también en el campo de fusión de sensores [6-7] para obtener una estimación más precisa y confiable de un parámetro. Un ejemplo clásico es la fusión de los datos de acelerómetros y giroscopios en un teléfono móvil o en un dron para estimar su posición en el espacio. En economía y finanzas, en donde se tienen modelos de series temporales en donde el FK estima variables económicas y financieras. En el procesamiento de señales se utiliza para mejorar las señales en sistemas de comunicación, detectar señales en presencia de ruido y más.

En medicina [9-10], se han utilizado para modelar la progresión de enfermedades y para lograr una mejora de las imágenes de resonancia magnética (MRI). En el diagnóstico de fallos [12-14] se ha empleado en la detección de actuadores y sensores dañados, así como en la detección de fugas en tuberías de agua y combustible. Actualmente, con el surgimiento del internet de las cosas (IoT), el FK resurge en aplicaciones donde se tienen datos muestreados y manejo de datos atemporales en la nube, no solo reduciendo la

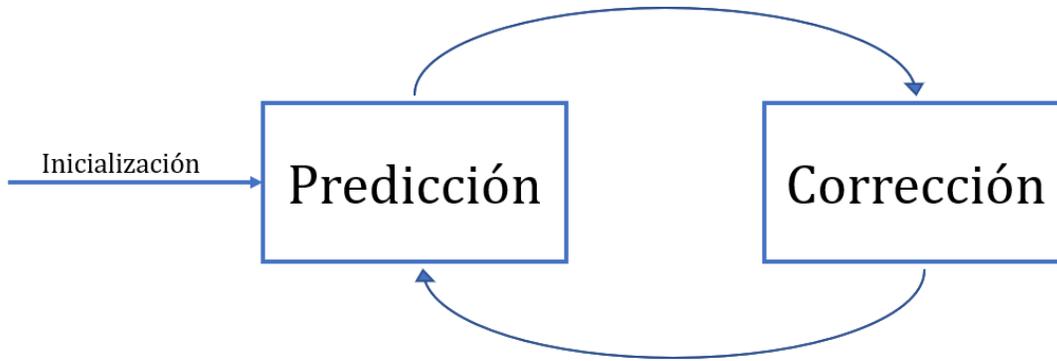


incertidumbre de los datos, sino también en tareas de predicción en línea [15-16]. Por tanto, el FK sigue siendo una herramienta poderosa para mejorar la precisión y fiabilidad de los sistemas IoT, lo que es crucial para muchas aplicaciones donde la precisión de las mediciones y las estimaciones son de suma importancia, a pesar de contar con señales ruidosas o con errores.

En este compendio se hace un pequeño resumen de los fundamentos matemáticos del FK, y se muestran algunas aplicaciones sencillas con respecto al filtrado de señales ruidosas y la estimación de estados. Estas aplicaciones se ilustran a través de ejemplos teóricos y prácticos, tanto mediante el uso de software comercial, como en tarjetas embebidas de uso popular, como lo es el sistema Arduino.

## **FUNDAMENTOS MATEMÁTICOS DEL FILTRO DE KALMAN**

La esencia del FK es la actualización de la estimación de un estado a partir de una predicción basada en el modelo del sistema y una medición. Utilizando el conocimiento del proceso y de los ruidos de medición, el FK proporciona la mejor estimación lineal insesgada del estado. El método de estimación exhibe un patrón conductual similar al de un control con retroalimentación, dado que estima el estado del proceso en un momento específico y, posteriormente, obtiene nuevas mediciones mediante retroalimentación con ruido incorporado. De esta manera, se puede afirmar que el conjunto de ecuaciones que rigen el algoritmo se dividen en dos fases: las ecuaciones de actualización temporal y las ecuaciones de actualización de las mediciones. Este proceso se ilustra en la Figura 2.

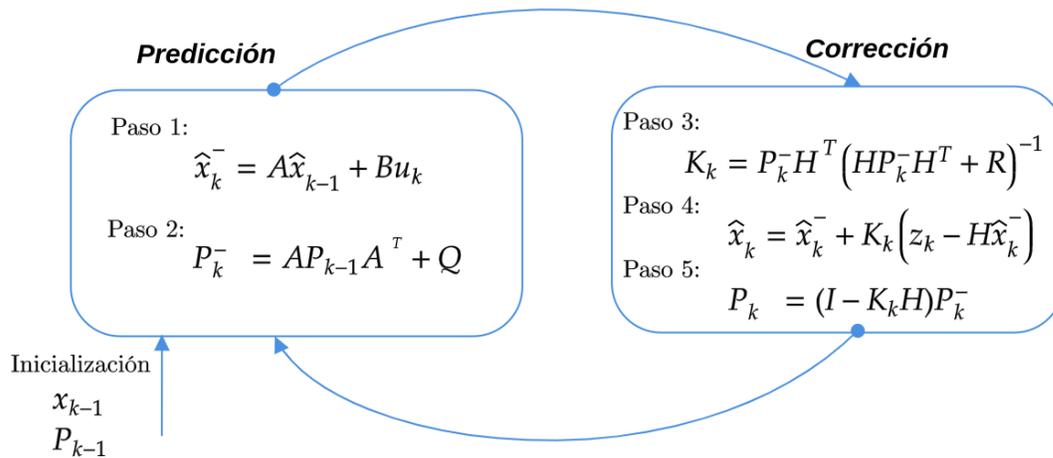


**Figura 2.** Proceso de estimación del Filtro de Kalman

La primera etapa comprende las ecuaciones encargadas de proyectar el estado actual un paso hacia adelante en el tiempo, junto con las matrices de estimación del error y de covarianza del error. A continuación, se presenta la segunda etapa, que incluye el conjunto de ecuaciones dedicadas a la actualización basada en las mediciones, con el objetivo de corregir y perfeccionar los resultados obtenidos en la primera etapa mediante una matriz de ganancia. Por esta razón, se le atribuye una característica de retroalimentación similar a la de un sistema de control. Nótese que el filtro es un proceso iterativo con ciclos de trabajo determinado por el tiempo de muestreo del sistema. Particularmente, al estar en función de tiempos de muestreo el filtro considera que se tiene un modelo matemático (para el caso de estimación) en tiempo discreto, definido por:

$$\begin{aligned} x_k &= Ax_{k-1} + Bu_{k-1} + w \\ z_k &= Hx_k + v, \end{aligned} \quad (1)$$

donde  $w$  y  $v$  representan ruido del proceso y del sistema con distribución Gausiana,  $z_k$  son las mediciones del sistema en instante  $k$ ,  $x$  es el vector de estados del sistema y las matrices  $A$ ,  $B$  y  $H$  son conocidas y representan la dinámica, las entradas y salidas medidas del sistema, respectivamente.



**Figura 2.** Diagrama representativo del proceso iterativo del Filtro de Kalman

El Filtro es un algoritmo matemático en donde las etapas de predicción y corrección están compuestas por un proceso de cinco pasos como se ilustra en la Figura 3. En el Paso 1, se encuentran plasmadas las ecuaciones que conforman a la etapa de predicción, es decir, las encargadas de proyectar las estimaciones de estado y covarianza hacia adelante en el tiempo, desde el paso  $k - 1$  hasta  $k$ . Donde  $\hat{x}_k^-$  representa la estimación del estado a priori. Dado que se considera que el ruido de medición es Gaussiano, esta se puede caracterizar mediante el cálculo de su desviación estándar y su media.

Nótese que de acuerdo a la Figura 2, el sistema considera una etapa de inicialización de  $\hat{x}_{k-1}$  y  $P_{k-1}$ . Donde la matriz  $P_k$  representa la covarianza del error en la estimación del estado actual del sistema, desde un punto de vista práctico estos valores se inicializan, en el caso de  $\hat{x}_{k-1}$  con valores aproximados al valor real (si se conocen, o cero) y la matriz de covarianza se asume con un valor inicial alto reflejando el nivel de incertidumbre sobre este valor, por ejemplo, 10, 100. Con estos valores iniciales se computa el valor de estimación dado en el Paso 1 y la nueva matriz de covarianza  $P_k$  como se muestra en el Paso 2.  $Q$  representa la covarianza del ruido o incertidumbre del proceso. La matriz  $Q$  se asume o se modela según el conocimiento que se tiene del sistema y puede depender de muchas cosas, como las propiedades del sistema y del ruido, o se selecciona para optimizar algún criterio de rendimiento. En algunos casos, la matriz  $Q$



puede ser ajustada o sintonizada a través de un proceso de prueba y error para obtener el mejor rendimiento del FK. Típicamente, la matriz  $Q$  es la varianza del ruido multiplicada por la matriz de identidad de orden igual al número de entradas del sistema.

Después de la etapa de predicción, corresponde la etapa de corrección o de actualización de mediciones; se comienza por el cálculo de la ganancia del FK como se muestra en el Paso 3. Se toma en cuenta la matriz de covarianza de las mediciones  $R$ , es decir la caracterización Gaussiana del ruido de los sensores, que por facilidad se multiplica por una matriz identidad.

Por último, tomando la medición del proceso entregada por el sensor o sensores  $z_k$ , se obtiene un estimado del estado a posteriori (Paso 4) y se actualiza nuevamente la matriz de covarianza  $P$  como se muestra en el Paso 5. Al término de la segunda etapa, comienza nuevamente la primer etapa de forma cíclica, así que, al término de cada par de actualizaciones y mediciones, el resultado estimado *a posteriori* se convierte en la nueva condición de estado necesaria para predecir el nuevo estado *a priori*.

## **APLICACIÓN DEL FILTRO DE KALMAN EN EL FILTRADO DE SEÑALES**

El FK también es usado para filtrar señales en tiempo real sobre todo cuando se tiene una señal ruidosa y se quiere obtener una estimación más suave y precisa de la señal original. La belleza del FK radica en su habilidad para fusionar la información de la señal ruidosa con información a priori sobre cómo evoluciona en el tiempo, lo que le ayuda a predecir el estado futuro y la incertidumbre del sistema para luego incorporar la nueva medición para ajustar la predicción y reducir la incertidumbre y por ende el ruido. En este caso dado que es una señal escalar en  $k$ , las matrices  $A = H = 1$  y  $B = 0$ , por lo que el sistema dinámico queda definido por:

$$\begin{aligned}x_k &= x_{k-1} + w \\z_k &= x_k + v\end{aligned}\quad (2)$$



A continuación, se muestran algunos ejemplos para ejemplificar esta aplicación:

*Ejemplo 1: Considere una señal senoidal ruidosa tomada de un sensor de medición inercial con ruido Gaussiano (disponible en <https://bit.ly/kalmanIMU>). Graficar la señal original y la señal filtrada.*

*Solución:* La señal se genera en MATLAB y se definen las condiciones iniciales:

En este caso  $R$  se conoce dado que se diseñó el ruido con ese valor, pero para  $Q$  se toma un valor 10 veces menor al de  $R$ , dado que se asume no conocido, tal que  $.Q = 0.0001$ ,  $R = 0.001$ ,  $P = 10$

```
Dato = load('IMU_kalman.txt'); % lectura de los datos
Q=0.00001; %process noise covariance Q
R=0.001
Xe= 10; %Valor a priori
P=10; % Matriz de covarianza a priori
```

Para efectos de generalización y reutilización del código, se recomienda escribir las ecuaciones del KF como una función, tal que:

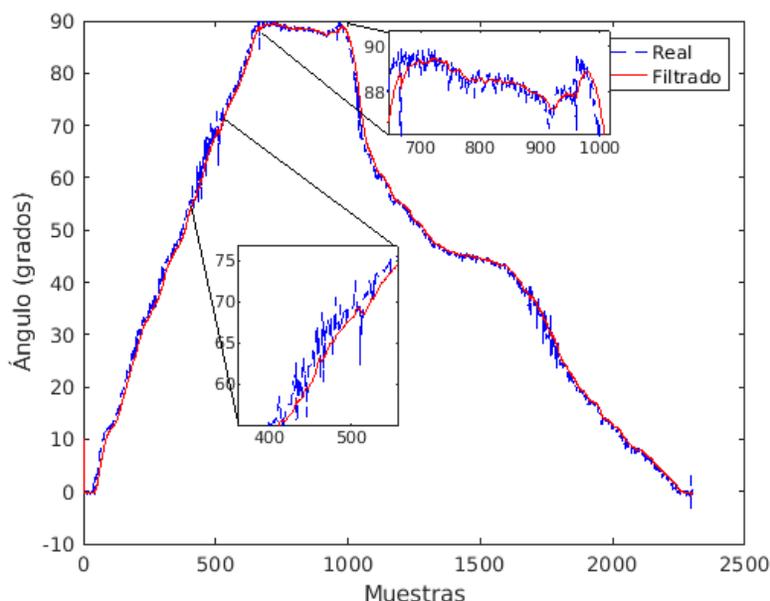
```
function [xe,Pm]= kalmanf_sensor(x,z,P,R,Q)
xmin =x;
P=P+Q;
% Ganancia de Kalman
K = P * inv(P + R);
% Corrección basado en la medición
xe = xmin + K*(z - xmin);
Pm = P - K*P;
```



La función `kalmanf_sensor` tiene como argumentos de entrada el estado a priori, la medición y los valores de las matrices de covarianza, y entre la estimación a posteriori de los estados filtrados y la matriz de covarianza. Finalmente, para resolver el problema basta con llamar a la función dentro de un bucle `while` o `for`, tal que:

```
Te = 1; %Tiempo de muestreo
for k=2:size(Dato,1)/Te
z(k)=Dato(k-1);
%Filtro de Kalman
[xe(k), Pm]= kalmanf_sensor(xe(k-1),z(k-1),P,R,Q);
P=Pm; % actualización de P
end
```

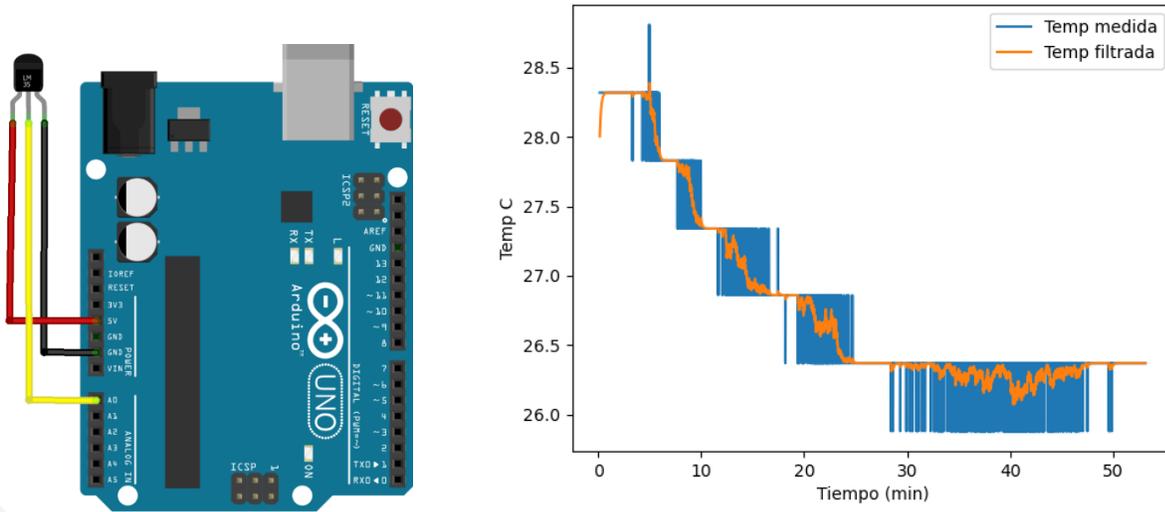
El resultado se muestra en la Figura 3. Claramente, la señal filtrada está suavizada con respecto a la señal original. Supongamos que la medición da señales de ángulos para un sistema de control de balanceo, es comprensible suponer que la señal acondicionada mejoraría el desempeño del controlador puesto al no tener esas variaciones abruptas por el ruido natural del sensor. Sin embargo, debe tenerse cuidado, puesto que un filtro mal sintonizado puede dar como resultado una señal con pérdida de información.



**Figura 3.**  
Resultados del filtrado.



*Ejemplo 2: Con la finalidad de ejemplificar la facilidad de programar el Filtro de Kalman en diferentes entornos y lenguajes de programación y su desempeño en el filtrado de señales en línea, se considera el caso de medición de temperatura mediante un sensor LM35 y una tarjeta de desarrollo Arduino como se muestra en la Figura 4. La adquisición de los datos se consideró durante 50 minutos aproximadamente.*



**Figura 4.** Izquierda) diagrama de conexión. Derecha) Datos reales Vs Filtrados.

El programa de Arduino se muestra en el Anexo A.1 y su diagrama de conexión en la Figura 4-Izquierda. En el código se aprecia la sencillez de programación en línea del Filtro de Kalman con comandos simples. Sin embargo, una desventaja de esta plataforma es la de guardar los datos en un archivo de datos csv o txt. Para ello es necesario desarrollar un programa para la captura de estos datos. Para ilustrar que la implementación del filtro es independiente del tipo de software, a continuación, se muestran las líneas de código para leer los datos del Arduino a través del puerto serial con Python en el Anexo A.2.



Los resultados se muestran en la Figura 4-Derecha. Como se aprecia, la lectura en línea del sensor LM35 es bastante ruidosa, por lo cual al realizar el filtrado en línea se logra suavizar los datos, lo cual no solo mejora el desempeño del sensor, lo que impactaría positivamente en un sistema de control en línea. Aunque en este caso el ejemplo es simple, este mismo esquema se aplicaría para cualquier otro tipo de sensor, por ejemplo, una unidad de medición inercial, encoders, acelerómetros, entre otros.

## FILTRO DE KALMAN COMO ESTIMADOR DE ESTADOS

Como se mencionó anteriormente, una de las aplicaciones más utilizadas del FK es su utilidad para estimar estados desconocidos aún con información de señales ruidosas. En este caso, la función de MATLAB puede considerarse como:

```
function [x_est, P] = kalman_full(A, B, H, Q, R, y, u, xmin, P)
    % Prediccion
    x_pred = A*xmin + B*u;
    P_pred = A*P*A' + Q;

    % Actualizacion
    K = P_pred*H'/(H*P_pred*H' + R);
    x_est = x_pred + K*(y - H*x_pred);
    P = (eye(size(A,1)) - K*H)*P_pred;
end
```

A diferencia del código anterior, este considera argumentos de entrada las matrices  $A$ ,  $B$  del Sistema (1), además de la señal medida  $z_k$ , la entrada  $u_k$ . Con esta información se realiza el proceso de predicción y actualización descrito anteriormente. Dando como resultado un estado estimado que minimiza la varianza del error, suponiendo que el modelo del sistema y las características del ruido son conocidos y Gaussianos. Es importante mencionar que la aplicación del FK es de gran utilidad en muchas aplicaciones del control automático, aun cuando no se tenga conocimiento exacto de las señales de ruido, se pueden sintonizar de forma heurística.

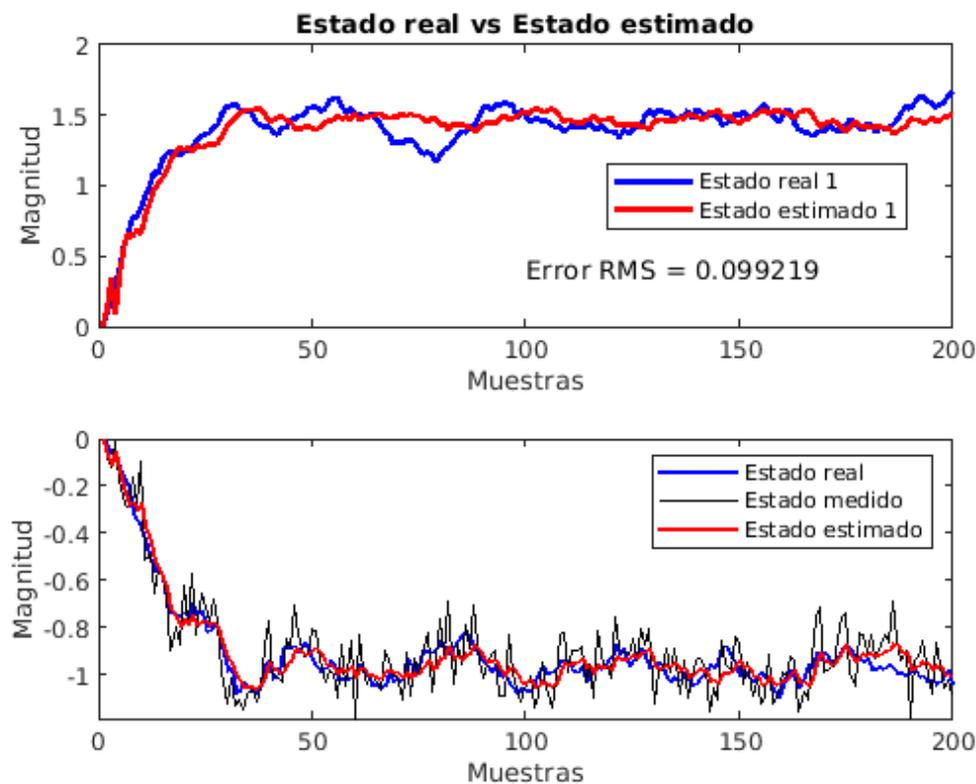


*Ejemplo 3: Considere un sistema numérico con dos estados sujetos a ruido de medición aleatorio gaussiano, donde:*

$$A = \begin{bmatrix} 0.9 & 0.1 \\ 0.1 & 0.9 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 0.1 \\ 0.2 \end{bmatrix},$$

*se asume que solo se mide el estado 2 con ruido de varianza de 0.01 y media 0.*

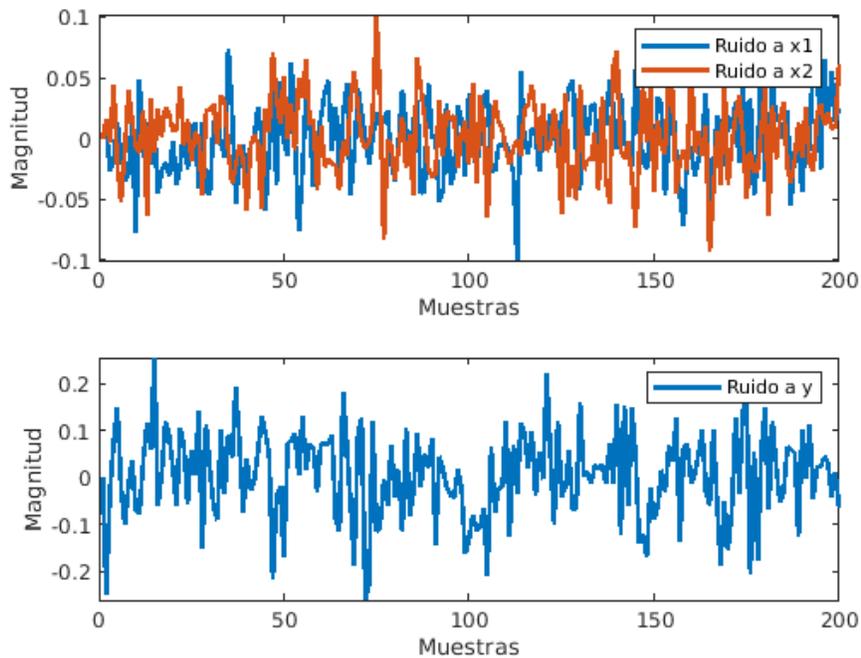
*Solución:* Similar al ejemplo anterior al tratarse de un filtro enteramente computacional, este se resuelve con MATLAB como se muestra en el Anexo B. Los resultados se muestran en la Figura 5:



**Figura 5.** Estimación del estado 1 con la señal ruidosa del estado 2.



Como se ilustra, el FK estima el estado dos con bastante precisión con un error cuadrático medio de 0.1376 a pesar de la magnitud de la señal del ruido. Además, logra filtrar la señal del estado medido, por lo cual, en un sistema de control retroalimentado, es factible considerar las dos señales del FK. Para ilustrar la importancia de eliminación de Kalman, el ruido adicionado se muestra en la Figura 6.



**Figura 6.** Ruido Gaussiano del proceso y los sensores

## APLICACIÓN AL DIAGNÓSTICO DE FUGAS HIDRÁULICAS

Una de las líneas a la cual se ha enfocado el grupo de trabajo del Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez está íntimamente relacionada con el diagnóstico de fallas. Entendiéndose como una falla a una desviación no permitida de un parámetro, sensor o actuador por encima o debajo de los valores nominales. Por ejemplo, una descalibración de un sensor puede considerarse como una falla; una fuga de agua que cambia los parámetros de una red hidráulica se considera igualmente como una falla. Particularmente en el campo del diagnóstico de fugas se tienen numerosos trabajos en revistas prestigiosas del área de ingeniería [17-19].



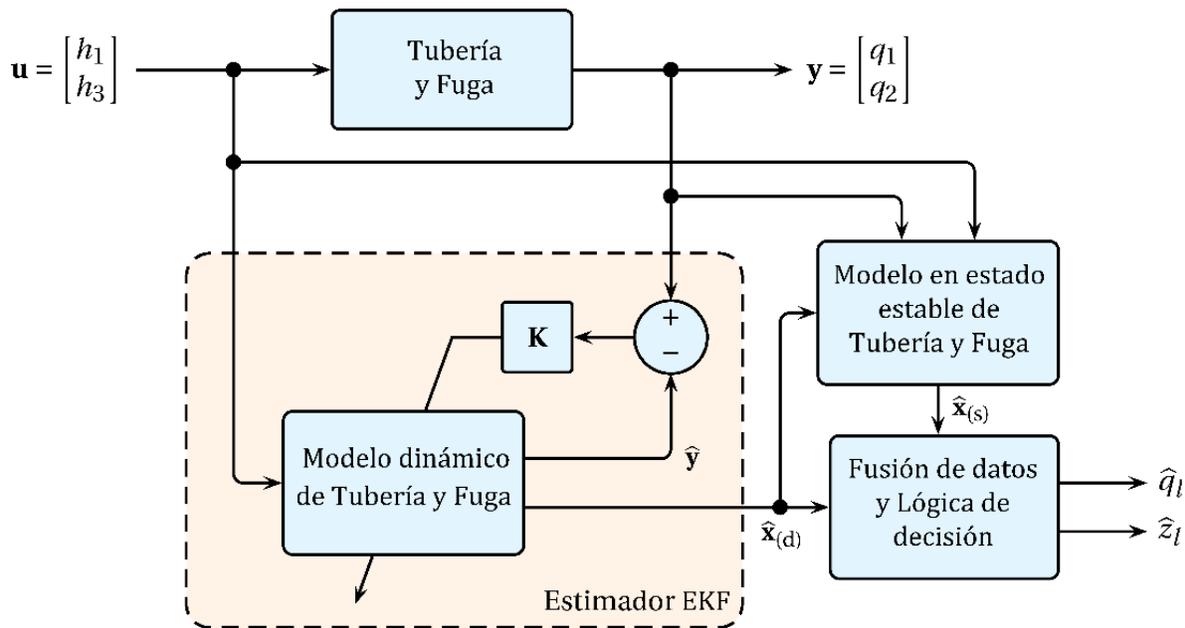
Una red de distribución de agua (RDA) es un conjunto de tuberías que trabajan a determinadas presiones para abastecer agua potable a los usuarios. Como son sistemas que operan de forma prolongada, continuamente ocurren fugas que ocasionan importantes pérdidas económicas, daños al medio ambiente y riesgos para la salud. Para dimensionar el problema, en las redes de distribución de agua el porcentaje mundial de pérdidas por fugas volumétricas se ha estimado en torno al 21%, aunque en países como México alcanza un valor medio del 40%.

Existen varios métodos para la detección directa de fugas, que se basan en la detección física, visual o palpable del fluido, como los métodos basados en hardware, robots, ultrasónicos, entre otros. Los métodos basados en hardware dependen en gran medida del equipo físico instalado a lo largo de la tubería.

En cualquier caso, el diagnóstico de fugas no solo es importante detectar la fuga y cuantificarla, sino que es prioritario localizarla con la mayor precisión posible. Así, es necesario disponer de algoritmos que determinen con precisión la ubicación de la fuga, ya que no siempre es visible desde el exterior de la tubería. Un error de pocos metros en la localización de una fuga en tuberías subterráneas supone un coste importante por excavar en una zona errónea para repararla [19].

En los trabajos reportados por investigadores del TecNM Tuxtla Gutiérrez se han propuesto diferentes metodologías para la detección, localización y estimación de fugas basada en el FK. Estas soluciones que se encuentran reportada a detalle en las referencias [17-19] incorporan la solución en estado estacionario del modelo dinámico de la tubería para refinar la solución y proponen una estrategia para acelerar la convergencia del proceso iterativo.

Una característica que se destaca es la implementación en línea de estos algoritmos en una planta piloto de 256 metros localizada en el Laboratorio de Hidroinformática de la institución. Lo cual representa un avance significativo con respecto a la mayoría de los trabajos referidos en la literatura que se limitan a presentar resultados de simulación o cálculos offline.



**Figura 7.** Esquema de implementación del Filtro de Kalman par la estimación de fugas en línea.

El esquema general se muestra en la Figura 7. Primeramente, se toman en cuenta las mediciones de presiones  $[h_1, h_2]$  y de caudales  $[q_1, q_2]$ , las cuales alimentan a un modelo del FK, y se hace el cómputo de predicción y corrección de la señal en línea. Para reducir el costo computacional se aplica una estrategia simple, pero poderosa: si no se ha detectado una fuga se considera el modelo en estado estacionario, si hay se detecta una fuga, se considera un modelo dinámico y una estrategia de fusión sensoria para lograr resultados de estimación de la posición y localización de la fuga.

Los resultados reportados en [17-19] demuestran que esta estrategia de estimación de fugas logra un alto porcentaje de precisión en la localización, pero además reduce el costo computacional, con lo cual es factible su implementación en línea.



## CONCLUSIONES

El Filtro de Kalman es una herramienta fundamental en el campo de la ingeniería en donde el filtrado y estimación de señales es necesaria para proporcionar una estimación precisa de una señal o estado desconocido en presencia de ruido y errores de medición. Una de las aplicaciones más importantes del Filtro de Kalman se encuentra en la navegación y el seguimiento de objetos en el espacio. Por ejemplo, en sistemas de posicionamiento global (GPS), vehículos autónomos, sistemas de IoT, campo médico, entre otros, obteniendo así una estimación precisa de la señal a medir o estimar. Además, ha encontrado amplias aplicaciones en el diseño de sistemas de diagnóstico de fugas hidráulicas, en donde su función consiste en estimar la posición y magnitud de la fuga con base a señales medidas de presión y caudales.

Es claro que la influencia de Rudolf Kalman en ingeniería es muy amplia y su algoritmo permitió y sigue permitiendo grandes avances científicos, por lo cual su nombre debe de estar a la par de grandes genios de la informática como Linus Torvads, Bill gates o Alan Turin. Parte de este desconocimiento se debe a que su principal aplicación es en el mundo del control automático, la cual se le conoce como la ciencia poco conocida, pero la más utilizada.

## AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Tecnológico Nacional de México quien ha financiado las investigaciones que fueron clave para el desarrollo de esta publicación a través de la convocatoria 2023 de proyectos de investigación y desarrollo tecnológico.



## REFERENCIAS

- [1]. How an Inventor You've Probably Never Heard of Shaped the Modern World. MIT Technology Review (Disponible en línea en: <https://www.technologyreview.com/2016/09/05/157723/how-an-inventor-youve-probably-never-heard-of-shaped-the-modern-world/>)
- [2]. Zhao, L., Qiu, H., & Feng, Y. (2016). Analysis of a robust Kalman filter in loosely coupled GPS/INS navigation system. *Measurement*, 80, 138-147.
- [3]. Barrau, A., & Bonnabel, S. (2018). Invariant kalman filtering. *Annual Review of Control, Robotics, and Autonomous Systems*, 1, 237-257.
- [4]. Choi, J., Park, J., Jung, J., Lee, Y., & Choi, H. T. (2020). Development of an autonomous surface vehicle and performance evaluation of autonomous navigation technologies. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 18, 535-545.
- [5]. Khalaf, M., Youssef, A., & El-Saadany, E. (2017, October). Detection of false data injection in automatic generation control systems using Kalman filter. In *2017 IEEE Electrical Power and Energy Conference (EPEC)* (pp. 1-6). IEEE.
- [6]. Moon, S., Park, Y., Ko, D. W., & Suh, I. H. (2016). Multiple kinect sensor fusion for human skeleton tracking using Kalman filtering. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 13(2), 65.
- [7]. Farag, W. (2021). Kalman-filter-based sensor fusion applied to road-objects detection and tracking for autonomous vehicles. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part I: Journal of Systems and Control Engineering*, 235(7), 1125-1138.



- [8]. Munguía, R., Davalos, J., & Urzua, S. (2019). Estimation of the Solow-Cobb-Douglas economic growth model with a Kalman filter: An observability-based approach. *Heliyon*, 5(6), e01959.
- [9]. Hu, B., Qiu, W., Xu, C., & Wang, J. (2020). Integration of a Kalman filter in the geographically weighted regression for modeling the transmission of hand, foot and mouth disease. *BMC public health*, 20, 1-15.
- [10]. Liu, R., Wang, Z., Qiu, S., Zhao, H., Wang, C., Shi, X., & Lin, F. (2022). A wearable gait analysis and recognition method for Parkinson's disease based on error state Kalman filter. *IEEE Journal of Biomedical and Health Informatics*, 26(8), 4165-4175.
- [11]. Zhang, X., Zhou, Z., Chen, S., Chen, S., Li, R., & Hu, X. (2017). MR fingerprinting reconstruction with Kalman filter. *Magnetic Resonance Imaging*, 41, 53-62.
- [12]. Zhang, Q. (2018). Adaptive Kalman filter for actuator fault diagnosis. *Automatica*, 93, 333-342.
- [13]. Torres, L., Jiménez-Cabas, J., González, O., Molina, L., & López-Estrada, F. R. (2020). Kalman filters for leak diagnosis in pipelines: Brief history and future research. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 173.
- [14]. Santos-Ruiz, I., Bermúdez, J. R., López-Estrada, F. R., Puig, V., Torres, L., & Delgado-Aguiñaga, J. A. (2018). Online leak diagnosis in pipelines using an EKF-based and steady-state mixed approach. *Control Engineering Practice*, 81, 55-64.
- [15]. Lai, X., Yang, T., Wang, Z., & Chen, P. (2019). IoT implementation of Kalman Filter to improve accuracy of air quality monitoring and prediction. *Applied Sciences*, 9(9), 1831.



[16]. Metia, S., Nguyen, H. A., & Ha, Q. P. (2021). IoT-enabled wireless sensor networks for air pollution monitoring with extended fractional-order Kalman filtering. *Sensors*, 21(16), 5313.

[17]. Delgado-Aguiñaga, J. A., Santos-Ruiz, I., Besançon, G., Lopez-Estrada, F. R., & Puig, V. (2022). EKF-based observers for multi-leak diagnosis in branched pipeline systems. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 178, 109198.

[18]. Torres, L., Jiménez-Cabas, J., González, O., Molina, L., & López-Estrada, F. R. (2020). Kalman filters for leak diagnosis in pipelines: Brief history and future research. *Journal of Marine Science and Engineering*, 8(3), 173.

[19]. Santos-Ruiz, I., Bermúdez, J. R., López-Estrada, F. R., Puig, V., Torres, L., & Delgado-Aguiñaga, J. A. (2018). Online leak diagnosis in pipelines using an EKF-based and steady-state mixed approach. *Control Engineering Practice*, 81, 55-64.



## Anexo A.1 Programa de implementación de filtro de Kalman en Arduino

```
// PIN
const int tempSensorPin = A0;

// Kalman parámetros
float Q = 0.125;           // Process noise variance
float R = 4.0;             // Measurement noise variance
float x = 0;               // Initial estimate
float P = 1.0;             // Initial error covariance
float K;                   // Kalman gain

void setup() {
  // Start the serial communication
  Serial.begin(9600);
}

void loop() {
  // Lectura del sensor
  float tempReading = analogRead(tempSensorPin);

  // Convertir a datos de voltaje
  float voltage = tempReading * (5.0 / 1023.0);

  // Voltaje a temperatura
  float temperature = voltage * 100; // For LM35 temperature sensor

  // Kalman filter
  // 1. Compute Kalman gain
  K = P / (P + R);
```



```
// 2. Update estimate
x = x + K * (temperature - x);
// 3. Update error covariance
P = (1 - K) * P + Q;

// Impresión de los datos
Serial.print("Filtered Temperature: ");
Serial.println(x);
// Muestreo cada 0.5 segundos
delay(500);
}
```

## Anexo A.2 Programa para registrar los datos en Python

```
import serial
import time

arduino = serial.Serial('/dev/ttyACM1', 9600)
# Seleccionar el puerto COM (windows) o tty (linux) correcto

def log_data():
    with open("temperatura_datos.csv", "w") as f:
        while True:
            try:
                data = arduino.readline()
                f.write(data.decode("utf-8"))
                f.flush()
            except KeyboardInterrupt:
                break

if __name__ == "__main__":
    log_data()
```



## Anexo B: Programa en MATLAB para la estimación de los estados no medibles mediante señal ruidosa

**% Numero de pasos de tiempo**

N = 20;

Te=0.1;

**% Condiciones iniciales**

x = zeros(2, N/Te);

y = zeros(1, N/Te);

x\_est = zeros(2, N);

P = eye(2); % Covarianza de error inicial

**%Modelo**

A = [0.9909 0.0861  
-0.1722 0.7326];

B = [0.0997  
-0.0091];

H=[0 1];

Q = 0.001\*eye(2); % Covarianza de ruido de planta

R = 0.01; % Covarianza de ruido de medicion

u = ones(1, N/Te); % Entrada al sistema

**% Bucle de simulación**

**for** k = 2:N/Te

x(:,k) = A\*x(:,k-1) + B\*u(k-1) + sqrtm(Q)\*randn(2,1);

y(k) = H\*x(:,k) + sqrt(R)\*randn;

**%Programación del filtro**

**%Argumento entrada A,B,Q,R,mediciones, entrada, x estimada y P**

[x\_est(:,k), P] = kalman\_full(A, B, H, Q, R, y(k), u(k-1), x\_est(:,k-1), P);

**%la función actualiza x\_est y P**

**end**



**Las gráficas del sistema se generan con el siguiente código:**

```
figure(1);
clf
subplot(2,1,1);
plot(1:N/Te, x(1,:), 'b', 'LineWidth', 2);
hold on;
plot(1:N/Te, x_est(1,:), 'r', 'LineWidth', 2)
legend('Estado real 1', 'Estado estimado 1')

% Calcula el error entre el estado real y el estimado
error = x(1,:) - x_est(1,:);
% Calcula el error RMS
rms_error = sqrt(mean(error.^2));
% Muestra el error RMS en un cuadro de texto
text(0.5, 0.2, ['Error RMS = ', num2str(rms_error)], 'Units', 'normalized');
hold off
ylabel('Magnitud');
xlabel('Muestras');
% Crea el subplot

subplot(2,1,2);
plot(1:N/Te, x(2,:), 'b', 'LineWidth', 1.5); % Estado real
hold on;
plot(1:N/Te, y, 'k');
plot(1:N/Te, x_est(2,:), 'r', 'LineWidth', 1.5); % Estado estimado
title('Estado real vs Estado estimado');
ylabel('Magnitud');
xlabel('Muestras');
legend('Estado real 2', 'Estado medido 2', 'Estado estimado 2');
hold off;
```



## Identificación de sistemas aplicado a un proceso simple de intercambio de calor

Aguilar-Castillejos, Aldo E. <sup>1</sup>; García-Ramos, Osbaldo Y.<sup>2</sup>; Zepeda-Hernández, José A.<sup>3</sup>; Hernández-Sol, Alvaro<sup>4</sup>; Moreno-Rincón, Raúl<sup>5</sup>

<sup>1</sup>Instituto Tecnológico de Tuxtla Gutiérrez. Tuxtla Gutiérrez, Chiapas, México. C.P. 29050.

\*Autor para correspondencia: [aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx](mailto:aldo.ac@tuxtla.tecnm.mx)

### RESUMEN

En este trabajo se presenta la identificación del modelo matemático de un proceso simple de intercambio de calor. Los parámetros de modelo se realizan mediante técnicas de identificación de sistemas que nos permiten determinar los modelos matemáticos con datos tomados de forma experimental del sistema a identificar utilizando algoritmos de mínimos cuadrados recursivos. Para este trabajo se seleccionaron dos estructuras de modelado: al método paramétrico autorregresivo (ARX) y OE (Output-Error). El tratamiento de los datos y el proceso de identificación se realizó con el GUI (Interfaz Gráfica de Usuario) de identificación CATOKI. Por último, se realizó la validación del modelo matemático mediante pruebas en el dominio del tiempo y gráficas de residuos.

**Palabras clave:** ARX, ARMAX, Output Error, Modelo matemático.



## INTRODUCCIÓN

Debido a que los sistemas dinámicos abundan en nuestro medio ambiente, las técnicas de identificación de sistemas han cobrado gran relevancia en diversas áreas del conocimiento (ingenierías, economía, biotecnología, entre otros), donde se requiere de un modelo preciso para fines de análisis, predicción, simulación, diseño y control.

En particular, las técnicas de control actuales requieren de modelos matemáticos cada vez más exactos para el análisis y el diseño [4]. Siendo que, en muchos casos, tales modelos no pueden ser obtenidos en forma sencilla y económica a partir de las leyes que rigen cada proceso. Por lo cual, la identificación de sistemas dinámicos juega un papel decisivo. Esta herramienta es capaz de proporcionar los métodos necesarios para obtener de manera relativamente sencilla los modelos matemáticos buscados con un alto grado de exactitud [5].

El modelo matemático de un sistema consiste en una descripción conveniente de algunas de sus propiedades, y de acuerdo con un propósito particular. El modelo no necesita ser una exacta descripción del sistema, y el usuario debe saber esto para poder llevar a cabo su propósito. Los modelos que aquí se analizan se presentan como funciones de transferencia.

La identificación de sistemas se realiza mediante la obtención experimental de la estructura y los parámetros de un modelo que reproducen con suficiente exactitud las características dinámicas del proceso objeto de estudio [1].

Estimar los parámetros es contar con un modelo que se comporte como el sistema real, lo cual es de vital importancia en el mundo del diseño de controladores, sobre todo aquellos basados en modelos [7].



## MATERIALES Y MÉTODOS

Se especificará cómo se llevó a cabo la investigación, incluyendo el tipo de investigación, diseño experimental (cuando se traten de investigaciones experimentales), aparatos y equipos científicos, sustancias y materiales empleados, métodos, técnicas, procedimientos, así como el análisis estadístico de los datos obtenidos (incluyendo descripción del diseño experimental, la prueba de comparación de medias, y el programa estadístico empleados).

El enfoque de la identificación se puede realizar en función de la estructura del modelo y del comportamiento físico o no del mismo. Existen varias formas de catalogar los modelos matemáticos: deterministas o estocásticos, dinámicos o estáticos, de parámetros distribuidos o centrados, lineales o no lineales, y de tiempo continuo o tiempo discreto [1, 2].

El primer paso dentro del proceso de identificación es realizar un experimento sobre el sistema bajo estudio para obtener los datos de entrada en un instante de tiempo  $y(t)$ , obtenida a partir de una excitación en el mismo tiempo  $u(t)$ , que servirán de base para la obtención del modelo final. Los modelos paramétricos se describen en el dominio discreto, puesto que los datos que sirven de base para la identificación se han obtenido por muestreo. Un modelo discreto tiene la siguiente expresión general [3]:

$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} \cdot u(t) + \frac{C(q)}{D(q)} \cdot e(t) \quad (1)$$

Existen varias estructuras para obtener el modelo de un sistema: ARX, ARMAX, BOX-JENKIS, ARI-MAX, OUTPUT-ERROR. En este trabajo la identificación se realiza mediante las estructuras ARX y OUTPUT-ERROR.



## ARX

Es la relación entrada-salida más simple que se puede obtener (Fig.1). El modelo ARX, no es el modelo más natural, ya que el ruido es sumado a la salida, luego de pasar a través del denominador del sistema dinámico.

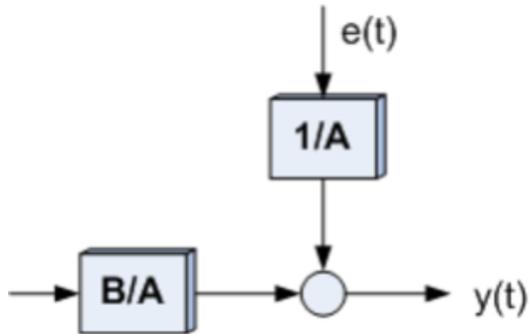


Fig. 1: Estructura ARX

$$y(t) + a_1 y(t-1) + \dots + a_n y(t-n_a) = b_1 u(t-1)$$

$$+ b_2 u(t-2) + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) + e(t) \quad (2)$$

Debido a que el término de ruido blanco  $e(t)$  entra como un error directo en la ecuación en diferencias, el modelo de la ec. (1) también es conocido como modelo o estructura de ecuación de error. En este caso los parámetros a ajustar serán:

$$\theta = [ a_1 \ a_2 \ a_3 \dots \ a_{n_a} \ b_1 \ b_2 \ b_3 \dots \ b_{n_b} ] \quad (3)$$

donde los polinomios son:

$$A(q) = 1 + a_1 q^{-1} + a_2 q^{-2} + \dots + a_{n_a} q^{-n_a} \quad (4)$$

$$B(q) = b_1 q^{-1} + b_2 q^{-2} + \dots + b_{n_b} q^{-n_b} \quad (5)$$



resultando:

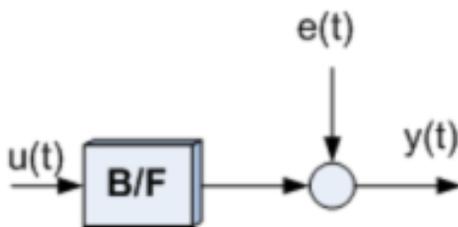
$$y(t) = \frac{B(q)}{A(q)} + \frac{1}{A(q)}e(t) \quad (6)$$

A este modelo se lo conoce como estructura “ARX”, donde “AR” hace referencia a la parte autorregresiva  $A(q).y(t)$  y “X” a la entrada extra (extra input)  $B(q).u(t)$  también conocida como variable exógena.

El flujo de señal de la figura 1 nos indica que posiblemente éste no sea el modelo más natural desde un punto de vista físico, ya que el ruido blanco es sumado a la salida luego de pasar a través del denominador del sistema dinámico. Sin embargo, el conjunto de modelos de ecuación de error posee una propiedad importante que lo convierte en una primera elección en muchas aplicaciones y, es que la forma del predictor define una regresión lineal.

### Estructura Output Error

Las estructuras de modelado anteriores tienen al polinomio  $A(q)$  como factor común en sus denominadores, y una forma del tipo de la figura 2.



**Fig. 2:** Estructura Output Error

Desde un punto de vista físico sería más natural parametrizar estas transferencias en forma independiente. Supongamos entonces por un momento que la relación entre la entrada y una salida no perturbada  $w(t)$  puede ser representada como una ecuación en diferencias lineal, y que la perturbación consiste en ruido blanco.



$$\begin{aligned}
 w(t) + f_1 w(t-1) + \dots + f_{n_f} w(t-n_f) &= b_1 u(t-1) \\
 + \dots + b_{n_b} u(t-n_b) \\
 y(t) &= w(t) + e(t)
 \end{aligned}
 \tag{7}$$

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + f_2 q^{-2} + \dots + f_{n_f} q^{-n_f}$$

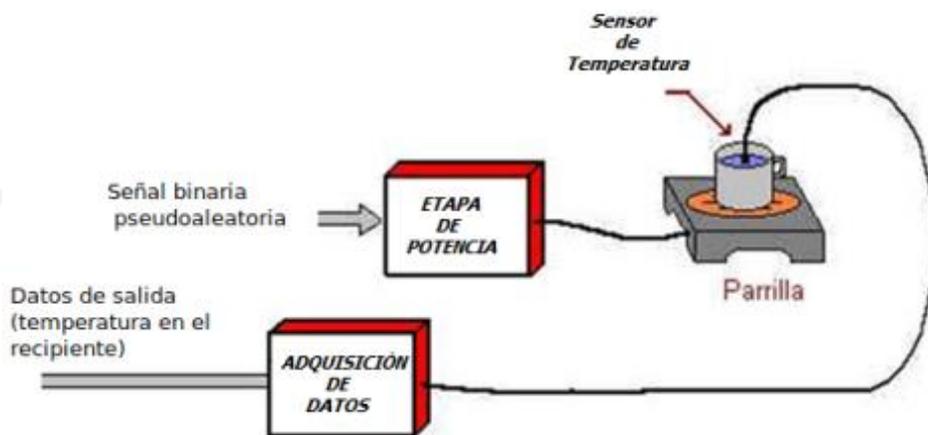
$$y(t) = \frac{B(q)}{F(q)} \cdot u(t) + e(t) \tag{8}$$

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para la obtención de resultados se realizó el proceso de identificación en primer lugar, con el que se generó el diagrama de Bode y análisis espectral de un modelo propuesto. Posteriormente se utilizaron las estructuras presentadas previamente para el diseño del modelo, tal como se presenta a continuación.

### Proceso de identificación

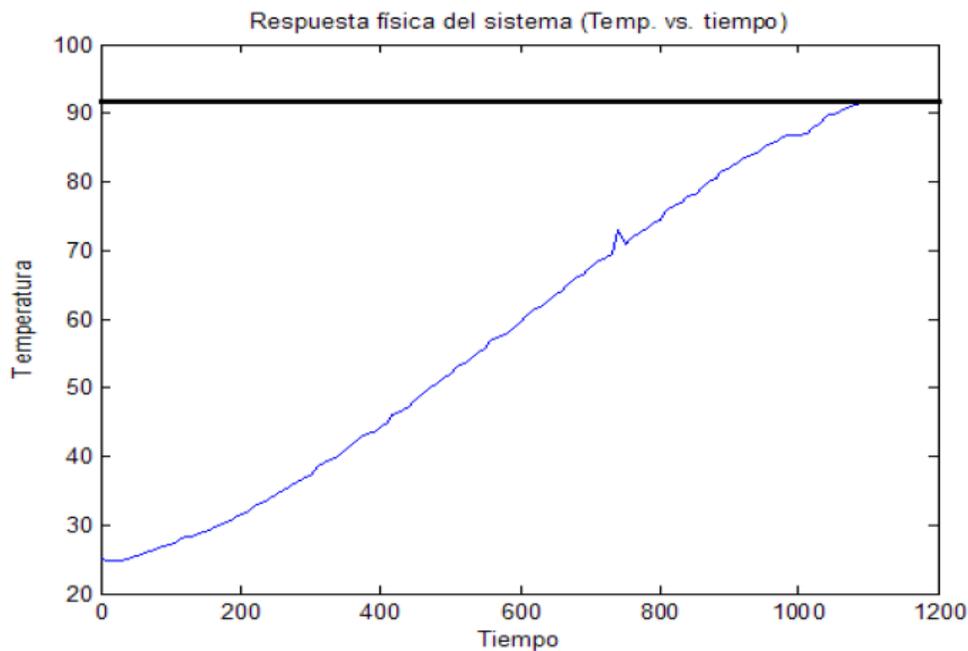
se seleccionó un proceso simple de intercambio de calor compuesto por una parrilla eléctrica que inyecta el calor a un recipiente de cristal con agua como se muestra en la fig. 3.



**Fig. 3:** Sistema simple de intercambio de calor



Uno de los primeros pasos del proceso de identificación es determinar la constante de tiempo del sistema para poder estimar el tiempo de muestreo del modelo discreto. Para determinar la constante de tiempo se aplica una entrada escalón al proceso (Figura 4), de modo que, manipulando los otros flujos, esta se regule dentro de la zona lineal. Esto nos permite determinar la constante de tiempo del sistema aplicando el método de los dos puntos, descrito por B. Wayne Bequette para obtener una constante de tiempo de 170 segundos.



**Fig. 4:** Respuesta de la planta a una entrada escalón.

Posteriormente se procedió al cálculo del tiempo de muestreo óptimo, para ello se utiliza la siguiente relación:

$$\tau_m N > \tau_p \quad (9)$$



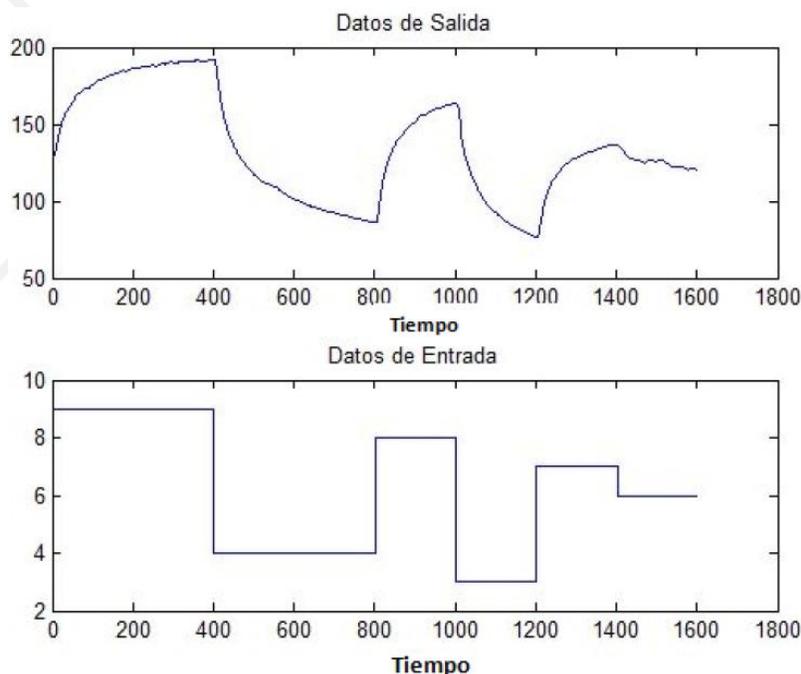
En donde  $\tau_m$  el tiempo de muestreo, N el número de bits de la SBPA y  $\tau_p$  la constante de tiempo de tiempo.

$$\tau_m > \frac{\tau_p}{N} = \frac{170}{8} = 21 \quad (10)$$

Con lo que elegimos un valor de 22 para cumplir esa condición y comenzar nuestra identificación del sistema. Es muy importante determinar el tiempo de muestreo ya que si este es muy grande puede presentarse el efecto de Aliasing y si el tiempo de muestreo es pequeño puede existir redundancia en los datos.

Una vez obtenido nuestro tiempo de muestreo se realizó una prueba al sistema a una entrada SBPA (Señal pseudoaleatoria) y se registraron también los datos de salida de este. Estos datos se almacenan en una matriz denominada datos que contendrá los valores de entrada y salida obtenidos en el proceso.

Se tomarán los valores medios de la secuencia de entrada y salida para realizar la estimación mediante el procesamiento de las señales haciendo uso del software Matlab. Los datos obtenidos se presentan en la Figura 5:



**Fig. 5:** Arriba: Señal de entrada SBPA aplicada al sistema. Abajo: Respuesta del sistema a la entrada SBPA.



A partir de la estructura obtenida es posible predecir el comportamiento en la frecuencia del sistema haciendo uso del diagrama de Bode (Figura 6), comparando de esa manera que la eliminación de tendencias proporciona una aproximación cercana a los datos físicos del sistema monitorizados con anterioridad.

Se hace notoria la irregularidad de los primeros datos, sin embargo, debemos considerar que el sistema posee un tiempo muerto considerable en consecuencia de la naturaleza del mismo (excitación de moléculas lentas en un principio) para responder de forma inmediata. Conforme el sistema se regulariza los datos comienzan a adaptarse de mejor manera, otorgando una buena aproximación siempre tomando en cuenta ese tiempo de reacción inicial.

### **Diseño del modelo**

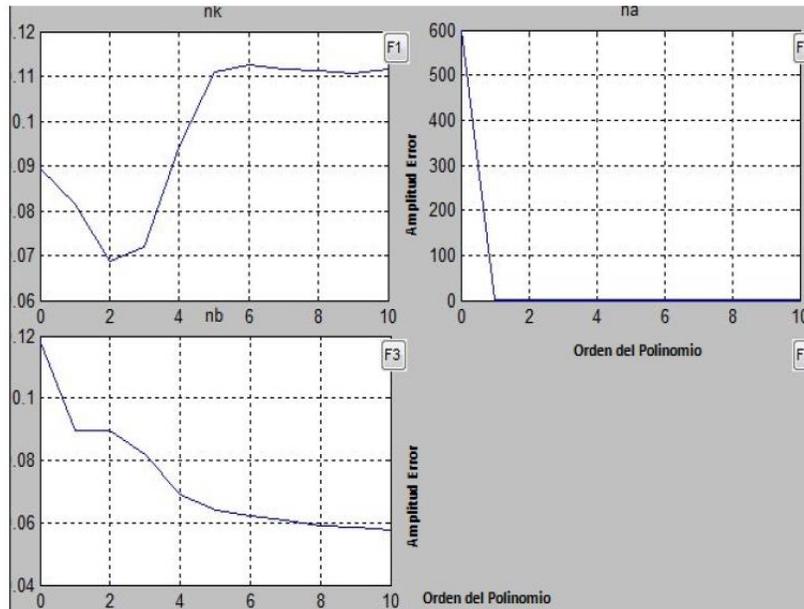
El diseño de modelos en base a estructuras es un proceso relativamente tedioso, se hace necesario tomar en cuenta muchos parámetros que son perceptibles al sistema, como perturbaciones provocadas por el medio y tiempos de reacción del sistema al aplicar entradas muy rápidas. Todo esto ha sido simplificado en un estudio anterior realizado en el Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET), que dio como resultado un Toolbox desarrollado en Matlab nombrado como Catoki [8] que permite realizar toda la identificación de forma fácil e intuitiva. Con este Toolbox el proceso de identificación se reduce a identificar el orden de los polinomios de la estructura seleccionada y la construcción de modelo matemático se realiza de forma automática. La selección del orden correcto de cada uno de los polinomios se realiza mediante una función de pérdida (Loss Function) programada en Matlab. El comando Loss Function relaciona un porcentaje de error para cada orden del polinomio.

### **Identificación mediante la estructura ARX**

Para determinar el orden de los polinomios se utilizó el comando Loss Function (Loss.Fcn) de Matlab, tomando valores constantes elevados de  $na$ ,  $nb$ , podemos calcular  $nk$  siempre observando la gráfica (Figura 7), en donde se puede ver que el valor mas



adecuado es donde la pendiente de error es menor (cercana a 0). A partir de ese dato podemos obtener  $na$  al fijar la  $nk$  elegida y manteniendo constante  $nb$ , para posteriormente realizar el mismo proceso para completar nuestro vector de orden.



**Fig. 7:** Gráfica Loss Function para los polinomios de la estructura ARX.

Eje X: Orden del polinomio. Eje Y: Magnitud del Error.

En base a la gráfica nuestro vector de orden para la estructura ARX es el siguiente:

$$n = [na, nb, nk] = [3, 4, 2] \quad (11)$$

Con el vector de orden es posible obtener el modelo ARX:

$$G1 = arx(datos, [na, nb, nk]);$$

$$ftARX = d2c(G1(1,:))$$

Para lo cual el modelo discreto según dicha estructura es:

$$A(q)y(t) = B(q)u(t) + e(t) \quad (12)$$

$$A(q) = 1 - 1.009q^{-1} - 0.96q^{-2} + 0.978q \quad (13)$$

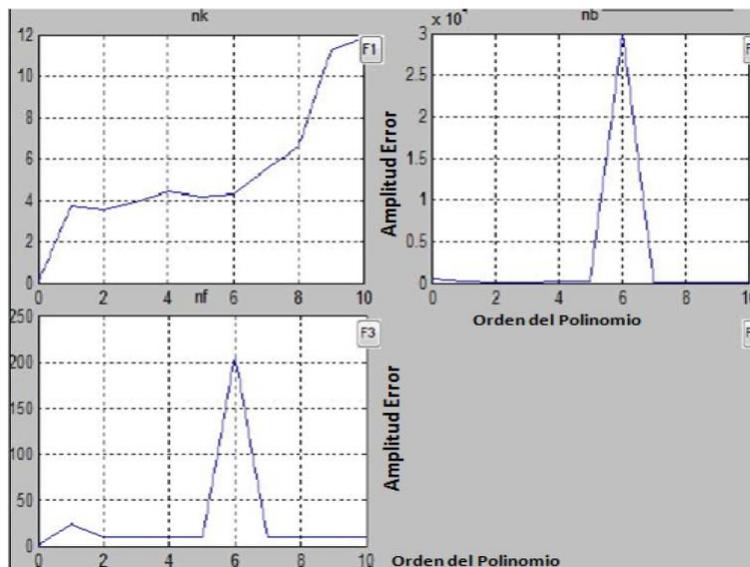
$$B(q) = -3.76 \times 10^{-6} q^{-2} - \dots + 2.04 \times 10^{-5} q^{-5} \quad (14)$$



El modelo continuo no es posible obtenerse debido a que existe un polo en el origen, eliminando la factibilidad de la transformación discreta a continua.

### Identificación mediante la estructura Output Error

Aplicando la misma metodología anteriormente descrita; se realizan las pruebas de funciones de pérdida para la estructura tipo OE (Figura 8).



**Fig. 8:** Gráfica Loss Function para los polinomios de la estructura Output Error.

Los mejores resultados se obtienen con el vector de orden:

$$n = [nb, nf, nk] = [10, 3, 0] \quad (15)$$

Se hace notar la elección de  $nb$  después del pico de la función debido a que presenta menor error en la gráfica de Loss Function.

El modelo OE es obtenido mediante el comando:

```
G2=oe(datos,[nb,nf,nk])
```

```
ftOE=d2c(G2(1,:))
```



Con lo que se obtiene:

$$y(t) = \frac{B(s)}{F(s)}u(t) + e(t) \quad (16)$$

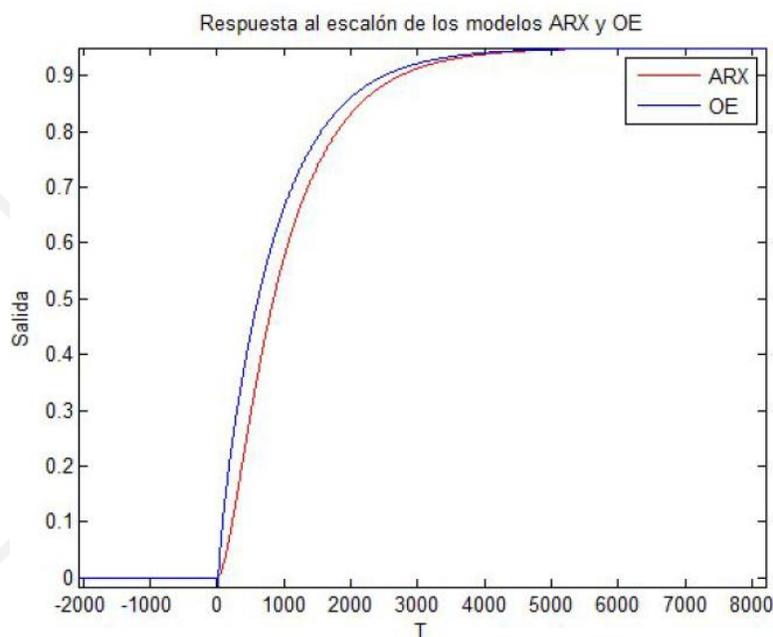
$$B(s) = 6.81 \times 10^{-5} s^9 - \dots - 3.1 \times 10^{10} s - 2.07 \times 10^8 \quad (17)$$

$$F(s) = s^9 + 19.5 s^8 + \dots + 2.46 \times 10^5 s + 230.9 \quad (18)$$

### Elección del modelo

Hasta este momento se han obtenido los polinomios y el orden para las dos estructuras, el proceso de evaluación para determinar si un modelo es apropiado para nuestro sistema se conoce como validación del modelo, que consta del análisis de las respuestas de los modelos a una entrada dada, al análisis de residuos y de la respuesta temporal.

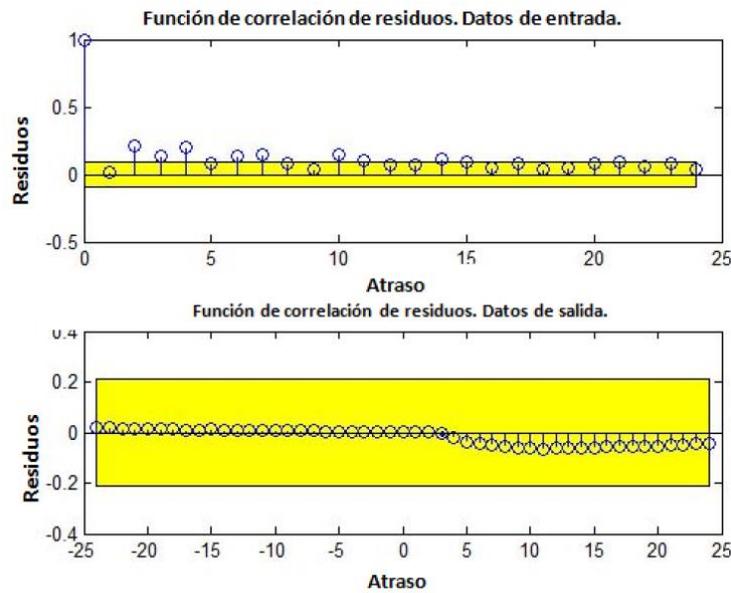
Las gráficas de respuesta temporal se obtuvieron aplicando a la entrada del modelo una señal de entrada escalón, tanto al modelo obtenido como al modelo no paramétrico. Se grafican ambos y se observan si tienen un comportamiento semejante y, de ser necesario, se calcula el error. Para el sistema de intercambio de calor esta gráfica se aprecia en la Fig. 9.



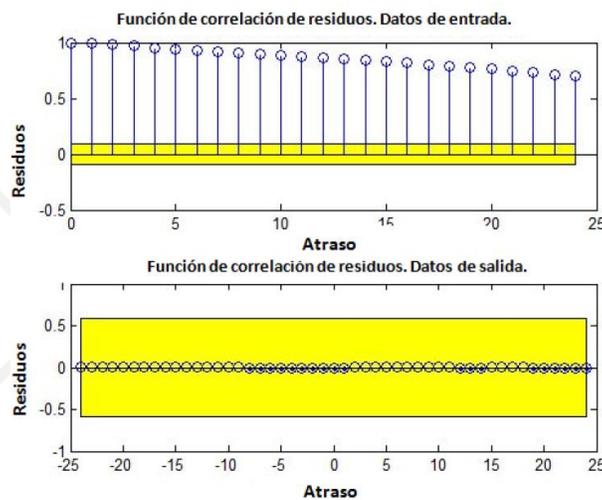
**Fig. 9:** Respuesta escalón del modelo obtenido y al modelo no paramétrico.



Los residuos asociados con los datos y el modelo dado (diferencia entre la salida real del proceso y la salida estimada con el modelo) son independientes de la entrada y tienen, idealmente, características de ruido blanco; CaToKi determina el error del modelo encontrado. En la Fig. 10 se puede ver que la estructura ARX se adapta mejor, dado que no provoca residuos considerables, en tanto que el OE genera un alto número de residuos en la función de correlación.



(a)



(b)

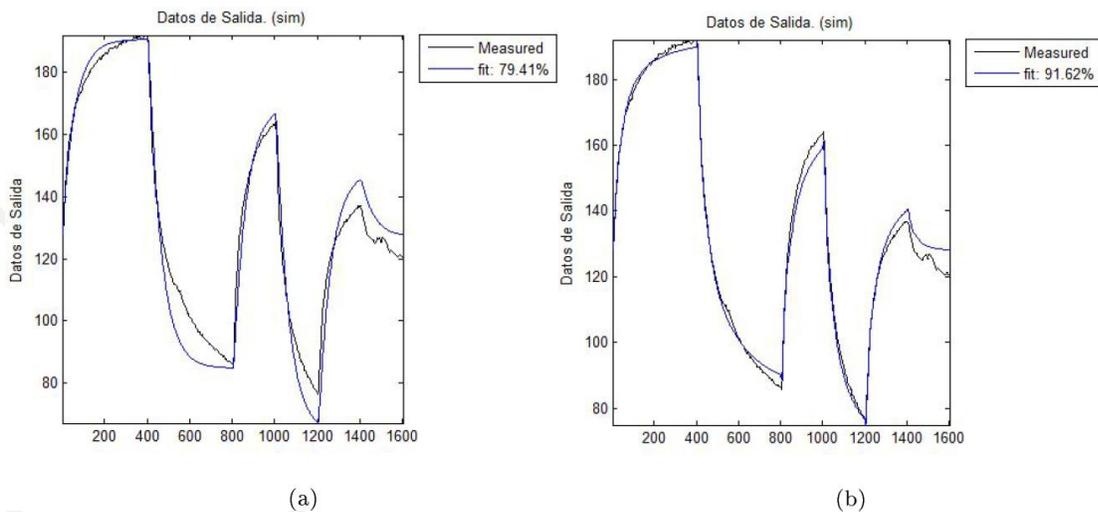
**Fig. 10:** Gráfica de residuos para: a) Modelo ARX. b) Output Error, respectivamente.



El criterio de análisis de la gráfica presentada en la Figura 10 es simple: la banda amarilla indica el error permitido para el modelo, por lo que si todos los residuos se encuentran dentro de esta banda es indicativo de que el error está dentro del permitido. Para este caso es de 0.2 y por ende la estimación de los parámetros del modelo es correcta y válida.

### Gráficas comparativas

Permite saber si el modelo escogido es capaz de reproducir los datos que se observan, a partir de excitar al modelo con una cierta entrada  $u(t)$ . El GUI corre una simulación excitando el modelo a la entrada con los datos originales. La gráfica resultante se aprecia en la Fig. 11. La gráfica en si puede resultar un poco confusa, pero lo más importante de ésta es que nos arroja un dato numérico, el cual nos indica el ajuste entre el modelo obtenido y la función de transferencia no paramétrica.



**Fig. 11:** Gráfica comparativa de la función no paramétrica y los modelos (ARX y OE respectivamente).

En la **Fig. 11** la diferencia es mucho más visible, incluso el ajuste es mucho más exacto para la estructura Output Error.



Tomando en cuenta todo el análisis realizado a las diferentes estructuras, se observa que la Output Error es la más adecuada. Debido a que produce un mejor ajuste, una mejor respuesta en frecuencia y una mejor respuesta al escalón.

Por lo que obtenemos como resultado satisfactorio un modelo Output Error de tercer orden:

$$B(q) = -15.4 + 7.689q^{-1} + \dots + 0.02628q^{-9} \quad (19)$$

$$F(q) = 1 - 0.9951q^{-1} - 1.002q^{-2} + 0.9975q^{-3} \quad (20)$$

## CONCLUSIONES

La identificación de sistema lineales mediante la obtención del modelo matemático que describe al sistema es de suma importancia para determinar los parámetros necesarios que requiere el sistema. Utilizando las estructuras de identificación ARX y Output Error, se observó que la segunda propuesta tiene una mayor eficiencia en el seguimiento del comportamiento del sistema.

Esto tomando en cuenta los resultados obtenidos en las gráficas comparativas, en donde el ajuste de la función no paramétrica es mayor (91.62 %) en la estructura Output Error. Además, la respuesta temporal, así como el análisis de residuos presenta ventajas visibles al ser comparada con la estructura ARX.

La estructura OE describe al sistema de forma correcta, además de que proporciona una respuesta más rápida y eficiente de acuerdo con los resultados presentados. Sin embargo, los datos obtenidos no denotan que la estructura ARX sea incorrecta, dado que la estructura obtiene resultados satisfactorios con un margen de error mínimo, pero sin otorgar el rendimiento requerido.



## REFERENCIAS

- [1]. Javier, Serrano.; José, Villar. Introducción a la identificación de sistemas. Técnica Industrial. Ingeniería y humanidades. España, 2005.
- [2]. Laboratorio de Sistemas Electrónicos de Control Discreto. Identificación de parámetros de un motor DC. Universidad de Alcalá, Ingeniería técnica en sistemas electrónicos. Madrid, España, 2005.
- [3]. Erick, Vallejo. Identificación paramétrica de sistemas dinámicos. Revista Científica Ingeniería y desarrollo, Núm. 2 (1997): Enero-Julio, Universidad del Norte, Colombia, 2011. DOI:  
<https://rcientificas.uninorte.edu.co/index.php/ingenieria/article/view/2170/1404>
- [4]. Kunushc, C. Identificación de sistemas dinámicos. Universidad de la Plata, Facultad de Ingeniería Electrónica, 2003.
- [5]. Ljung, L. System Identification: Theory for the user. Cap. 1-14, 1999.
- [6]. Ljung, L. System Identification Toolbox (user guide), The MathWorks, Inc. Estados Unidos, 1997. DOI:  
[http://www.ladispe.polito.it/corsi/sief/material/MATLAB\\_S\\_I\\_Toolbox.pdf](http://www.ladispe.polito.it/corsi/sief/material/MATLAB_S_I_Toolbox.pdf)
- [7]. Eykhoff, P. System identification: parameter and state estimation. University of Technology, Eindhoven, The Netherlands, 1993. DOI:  
<http://garfield.library.upenn.edu/classics1993/A1993MJ84500002.pdf>
- [8]. Francisco, Lopez E. (2023). CaToKi, System identification GUI (<https://www.mathworks.com/matlabcentral/fileexchange/11558-catoki-system-identification-gui>), MATLAB Central File Exchange. Retrieved June 9, 2023.



# REVISTA DIGITAL **TEC TUXTLA**



Revista de Divulgación Científica  
del Instituto Tecnológico de  
Tuxtla Gutiérrez

**EDICIÓN 1**

Publicación semestral  
Semestre **enero-junio 2023**