Revista Internacional de Investigación e Innovación Tecnológica

Página principal: www.riiit.com.mx

Inteligencia computacional en la sincronización de sistemas dinámicos

Computational intelligence in the synchronization of dynamical systems

Pulido-Luna, J.R.[a], López-Rentería, J.A.[b,d], Cárdenas-Maciel, S.L.[c], Cázarez-Castro, N.R.[d]*

[a] Dirección de Posgrado e Investigación; Universidad Tecnológica de Tijuana; C. P. 22253, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-5141-9915.
[b] SECIHTI - Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana; C. P. 22430, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-1663-3211.
[c] Departamento de Ciencias Básicas; Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana; C. P. 22414, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0002-8459-9924.
[d] Departamento de Ingeniería Eléctrica y Electrónica; Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Tijuana; C. P. 22430, Tijuana, Baja California. ORCID: https://orcid.org/0000-0001-6787-3947*.
jesus.pulido@uttijuana.edu.mx; jorge.lopez@tectijuana.edu.mx; lilettecardenas@ieee.org; nohe@ieee.org*

Innovación tecnológica: Aplicación de sistemas difusos como controladores adaptativos para lograr la sincronización de sistemas dinámicos.

Área de aplicación: Ingeniería de control, automatización, robótica y mecatrónica.

Recibido: 18 diciembre 2025
Aceptado: 08 junio 2026

Abstract

This popular science article presents the synchronization of dynamical systems, a phenomenon observed across nature, science and engineering. Its aim is to explain, in a clear and accessible manner, how computational intelligence (particularly fuzzy systems) can be used as a flexible and efficient strategy to achieve synchronization between dynamic systems. The evolution of the concept is traced from Christiaan Huygens' experiments to contemporary leader–follower control models. This work explains how fuzzy logic enables the adjustment of control gains based on the error between systems, improving energy efficiency and reducing the need for manual tuning. Finally, it concludes that fuzzy systems represent an adaptable and robust alternative for synchronization control by integrating expert knowledge, uncertainty, and qualitative analysis.

Keywords: Synchronization, dynamical systems, computational intelligence, fuzzy logic, control.

Resumen

Este artículo de divulgación presenta la sincronización de sistemas dinámicos, un fenómeno presente en la naturaleza, ciencia e ingenierías. Su objetivo es explicar, de manera clara y accesible, cómo la inteligencia computacional (particularmente los sistemas difusos), puede emplearse como una estrategia flexible y eficiente para lograr la sincronización entre sistemas dinámicos. Se presenta la evolución del concepto desde los experimentos de Christiaan Huygens hasta los modelos contemporáneos de control líder-seguidor. Se explica cómo la lógica difusa permite ajustar las ganancias de control en función del error entre los sistemas, mejorando la eficiencia energética y reduciendo la necesidad de ajustes manuales. Se concluye que los sistemas difusos constituyen una alternativa adaptable y robusta para el control de sincronización, al integrar conocimiento experto, incertidumbre y análisis cualitativo.

Palabras clave: Sincronización, sistemas dinámicos, inteligencia computacional, lógica difusa, control.

1. Introducción

La sincronización es un fenómeno fascinante que puede observarse en numerosos aspectos del mundo natural y tecnológico: desde los relojes de péndulo de Huygens que se movían al unísono, hasta los sistemas eléctricos, biológicos y sociales que ajustan su comportamiento para trabajar de forma conjunta [1][2]. En ingeniería, la sincronización resulta esencial para garantizar que distintos componentes de un sistema operen de manera coordinada, eficiente y estable.

Con el avance de la inteligencia computacional, nuevas herramientas permiten abordar estos problemas de sincronización con mayor flexibilidad. Una de las más destacadas es la lógica difusa, una técnica inspirada en la forma en que los humanos interpretan conceptos imprecisos o ambiguos [3]. A diferencia de los métodos clásicos, los sistemas difusos pueden adaptar sus decisiones en función del contexto, permitiendo un control más natural y eficiente.

En este artículo de divulgación científica se explora, de manera accesible y dirigida a un público general con interés en ciencias e ingeniería, cómo los sistemas difusos pueden aplicarse a la sincronización de sistemas dinámicos. Con este objetivo, se integra la evolución histórica del concepto de sincronización, los fundamentos de los sistemas difusos y su aplicación al esquema de control líder-seguidor, mostrando cómo esta tecnología puede ajustar automáticamente los parámetros de control en función del error entre los sistemas a sincronizar.

2. Sincronización

En 1656, el investigador holandés Christiaan Huygens, conocido por sus estudios en óptica y la construcción de telescopios y relojes, fue el primer científico que observó y describió el fenómeno que hoy conocemos como sincronización. Huygens descubrió que un par de relojes de péndulo colgados de un soporte en común se habían sincronizado, es decir, sus oscilaciones coincidían de forma perfecta y los péndulos se movían al mismo tiempo en direcciones opuestas. Huygens logró dar no sólo una descripción exacta, sino también una explicación cualitativa de este efecto de sincronización mutua; recalcó correctamente que la conformidad de los ritmos de dos relojes había sido causada por un movimiento imperceptible de la viga de madera en la que se encontraban colgados. En la actualidad, esto significa que los relojes

estaban sincronizados debido al acoplamiento a través de la viga de madera (ver Figura 1 Dibujo original de Christiaan Huygens ilustrando sus experimentos con el par de relojes de péndulo apoyados sobre una viga de madera [1].).

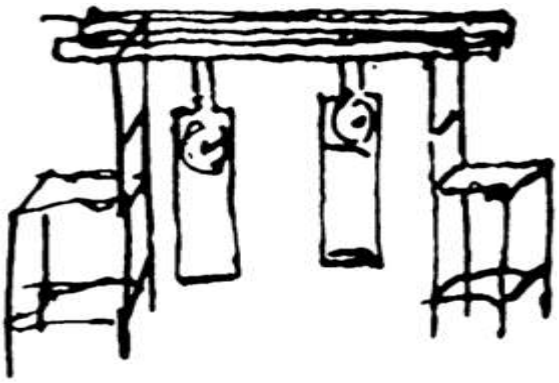


Figura 1 Dibujo original de Christiaan Huygens ilustrando sus experimentos con el par de relojes de péndulo apoyados sobre una viga de madera [1].

La sincronización es, en términos generales, un proceso en el que dos o más sistemas interactúan entre sí dando como resultado una evolución conjunta de algunas de sus propiedades dinámicas. Estos sistemas son capaces de ajustar su ritmo, “influidos unos por otros”, mostrando el mismo comportamiento a lo largo del tiempo [1].

La sincronización es un fenómeno que se puede observar en muchos aspectos de la vida cotidiana, y puede ser explicado por la existencia de osciladores autónomos que pueden estar acoplados entre sí. Los osciladores son sistemas que experimentan movimientos periódicos en el tiempo y pueden ser encontrados en muchas áreas de la física, la biología, la química y otras disciplinas. Por ejemplo, en el cuerpo humano, el ritmo circadiano es un oscilador que marca el tiempo en función de la rotación de la tierra. Este ritmo se sincroniza con los ciclos de luz y oscuridad y afecta a muchas funciones fisiológicas, como la temperatura corporal, la producción de hormonas y los patrones de sueño. Otro ejemplo de sincronización se puede encontrar en los relojes atómicos, que funcionan a partir de oscilaciones en la energía de los átomos.

Al mantener la frecuencia de oscilación constante, estos relojes pueden mantener una precisión increíblemente alta en la medición del tiempo. La sincronización también puede ser observada en sistemas sociales y en la naturaleza. Por ejemplo, muchos animales migran en sincronía en respuesta a cambios estacionales en el clima. En la Figura 2. Parvada de patos en migración síncrona., es posible observar una parvada de patos en proceso de migración. Algunos insectos, como las abejas, utilizan patrones de danza sincronizados para comunicar información sobre la ubicación de las flores [2].



Figura 2. Parvada de patos en migración síncrona.

Sin embargo, en algunas ocasiones el fenómeno de la sincronización no se da naturalmente, para esos casos se puede lograr de forma artificial al utilizar un controlador apropiado (por ejemplo, un dispositivo externo). Con el uso de un controlador es posible forzar la sincronización, modificar el tipo de sincronización presente o incluso eliminar la sincronización entre dos sistemas. Así como los ejemplos de fenómenos de sincronización mencionados, una variedad de problemas en ciencias e ingeniería requieren de sistemas cuyos comportamientos se acoplen entre si hasta ser el mismo. Frecuentemente se emplea una estrategia de sincronización de tipo líder–seguidor (también conocida como sincronización

maestro-esclavo) que destaca por su relativa facilidad para crear e implementar.

3. Sistemas dinámicos

El estudio de los sistemas dinámicos es esencial para describir la evolución de un fenómeno a lo largo del tiempo. Los sistemas mecánicos, biológicos, químicos, entre otros, son ejemplos claros de sistemas dinámicos que han sido estudiados en diversas áreas de las ciencias e ingenierías. Para describir estos fenómenos de la vida real, se utilizan expresiones matemáticas conocidas como modelos matemáticos, que establecen una regla específica de la dependencia del tiempo de las diferentes características del fenómeno estudiado. Dichos modelos pueden presentarse a través de diagramas causales, gráficas, diagramas de fase, entre otros [4].

La teoría cualitativa de los sistemas dinámicos es el campo de las matemáticas que se encarga de describir los diferentes comportamientos que un sistema dinámico puede presentar. Dentro de estos comportamientos, destacan los atractores, que pueden ser un valor o un conjunto de valores a los que el sistema dinámico permanece después de evolucionar en un lapso de tiempo. Existe una amplia variedad de atractores, pero como puede apreciarse en la Figura 3 Tipos de atractores., se pueden clasificar en cuatro categorías principales: puntos de equilibrio, ciclos límite, variedades y atractores extraños [5].

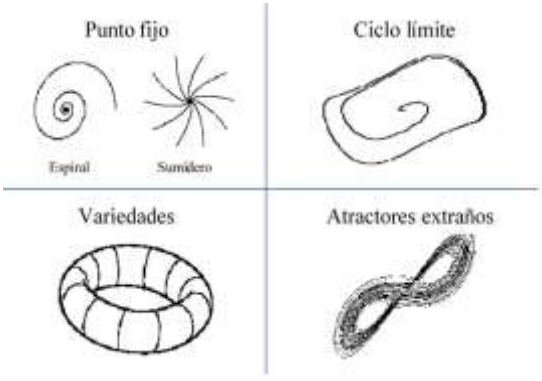


Figura 3 Tipos de atractores.

Los comportamientos antes mencionados se pueden encontrar en sistemas dinámicos asociados a múltiples fenómenos, por ello, las mismas técnicas de análisis que provienen de la teoría cualitativa pueden ser utilizadas. En muchos casos, el estudio de los sistemas dinámicos permite identificar los comportamientos actuales y proponer compensaciones a la dinámica natural (o comportamiento) del sistema dinámico (típicamente por medio de un controlador) para generar un comportamiento diferente, esto significa cambiar la evolución natural del fenómeno en el tiempo. A la acción que implica llevar el sistema de un comportamiento a otro preestablecido o requerido, se le conoce como control de sistemas dinámicos.

Dentro de las distintas técnicas de control disponibles en la literatura relacionada al tema, el uso de sistemas difusos nos provee la flexibilidad de la inteligencia computacional para que, mediante el control de sistemas dinámicos, se logre la sincronización de dos sistemas de interés.

4. Sistemas difusos

Los sistemas difusos son una rama de la inteligencia computacional y la teoría de control que permite modelar y controlar sistemas complejos que no son fáciles de describir con precisión matemática. La lógica difusa se basa en el principio de que muchos conceptos en el mundo real son vagos, imprecisos o ambiguos, y que la forma en que los seres humanos los perciben y manejan es diferente a la forma en que se expresan en términos matemáticos. Por ejemplo, la noción de “alto” o “bajo” es subjetiva y puede variar según el contexto, la cultura y la experiencia de cada persona. En lugar de tratar con valores binarios (verdadero/falso), la lógica difusa permite trabajar con valores continuos, lo que la hace más flexible y adaptable a situaciones complejas.

Un sistema difuso se compone de tres elementos principales: una base de conocimiento, un conjunto de reglas y un mecanismo de inferencia. La base de conocimiento contiene información sobre el problema que se está abordando, expresada en términos de variables lingüísticas (por ejemplo, “temperatura”, “velocidad”, “humedad”, etc.) y los términos que se utilizan para describirlos (por ejemplo, “caliente”, “frío”, “rápido”, “lento”, “seco”, “húmedo”, etc.). Estas variables lingüísticas son denominadas funciones de membresía y sus formas más comunes pueden observarse en la Figura 4. Formas más comunes de las funciones de membresía para la base del conocimiento en un sistema difuso. Las reglas establecen relaciones entre estas variables y establecen cómo se debe actuar en función de las condiciones observadas. El mecanismo de inferencia utiliza estas reglas para determinar la acción adecuada en función de las entradas dadas [3].

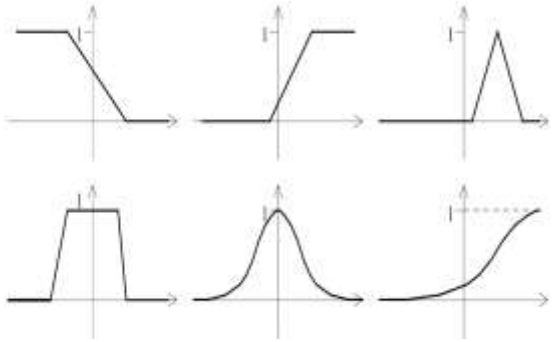


Figura 4. Formas más comunes de las funciones de membresía para la base del conocimiento en un sistema difuso.

Los sistemas difusos se utilizan en una amplia variedad de aplicaciones, como lo son: el control de procesos industriales [6], la toma de decisiones [7], el análisis de datos [8], la robótica [9][10][11], la medicina [12][13], la economía [14], la sincronización [15] y otros campos donde se requiere modelar sistemas complejos con un alto grado de incertidumbre o subjetividad [16]. Los sistemas difusos pueden ser especialmente útiles en situaciones donde la lógica convencional no es suficiente, como en el caso de sistemas de control que operan en entornos inciertos o cambiantes [17].

Los sistemas difusos son una herramienta poderosa y versátil para modelar y controlar sistemas complejos en situaciones donde la precisión matemática no es compatible para lograr la tarea del modelado. Al permitir trabajar con valores continuos, la lógica difusa es capaz de capturar la subjetividad y la incertidumbre del mundo real y ofrecer soluciones prácticas y efectivas para una amplia variedad de problemas en una amplia gama de campos.

5. Sincronización mediante sistemas difusos

Cuando el objetivo es la sincronización de dos sistemas dinámicos, el primer paso es definir el método con el cual serán sincronizados. La técnica de sincronización más común es el esquema líder–seguidor (comúnmente conocido como maestro–esclavo), en dicho esquema el sistema líder se comporta de forma autónoma, mientras que al sistema seguidor se le agrega un controlador, que con base en la diferencia o error e entre las dinámicas del sistema líder y el sistema seguidor, inyecta una energía o ganancia K en el sistema seguidor para corregir dicho error. Retomando la Figura 2 en la parvada de patos, por analogía se identifica el esquema de líder–seguidor: el pato que va adelante de todos actúa como el sistema líder, volando de forma autónoma, el resto de los patos imitan las acciones del pato líder, es decir, se comportan como un sistema seguidor, imitando el aleteo y decisiones del pato líder, en otras palabras, los patos controlan sus acciones con base en las acciones que el líder toma. El comportamiento del sistema líder y el sistema seguidor se dice que están perfectamente sincronizados si el error entre

ellos es cero. En la Figura 5. Esquema de sincronización de tipo líder–seguidor. es posible observar una representación del esquema de sincronización del tipo líder–seguidor.

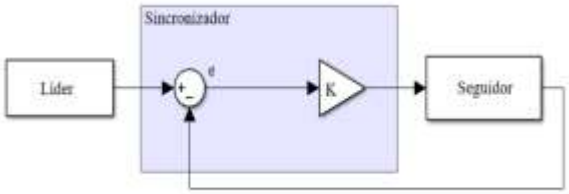


Figura 5. Esquema de sincronización de tipo líder–seguidor.

Los valores apropiados de las ganancias que permiten alcanzar la sincronización de los dos sistemas se determinan a través de las técnicas de análisis cualitativo para sistemas dinámicos, siendo en este caso el sistema que modela la evolución del error entre el sistema líder y el sistema seguidor considerando el controlador. El análisis permite identificar relaciones en cuanto a la forma y la velocidad en que se consigue la sincronización que están influenciadas por la magnitud de las ganancias en el controlador.

Una característica del esquema de sincronización líder–seguidor clásico es el hecho de que las ganancias son valores fijos, es decir, que las fuerzas de acoplamiento comandadas por el controlador serán las mismas sin importar el comportamiento del error presente entre las dinámicas de ambos sistemas. Por lo que, en el escenario en que los sistemas están cercanos a alcanzar o han alcanzado la sincronización, se aplica una cantidad excesiva de energía. Por otra parte, si se tiene el caso opuesto, en el que los sistemas están lejos de alcanzar la sincronización (el error es grande), emplear una ganancia fija trae la posibilidad de que la sincronización suceda en un tiempo grande o incluso que no suceda.

Considerando los inconvenientes citados debido a utilizar ganancias fijas en el controlador, se puede aprovechar las bondades de la inteligencia computacional y específicamente de los sistemas difusos, para incluirlos en el esquema de la Figura 5 buscando la mejoría en el desempeño o efectividad para alcanzar la sincronización. La Figura 6. Esquema de sincronización modificado., muestra el diagrama modificado del esquema de sincronización líder-seguidor que sustituye las ganancias fijas por un sistema de inferencia difuso que ajusta las ganancias en función del comportamiento del error en las dinámicas a través de reglas difusas que se expresan en el sentido: La ganancia disminuye en valor si el error es pequeño; en el caso de que el error es grande entonces la ganancia aumenta en valor [18][19][20].

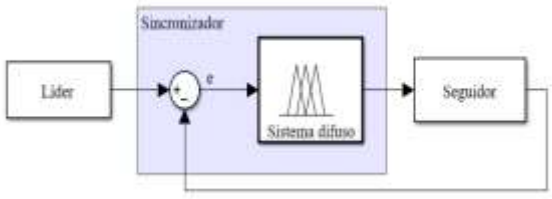


Figura 6. Esquema de sincronización modificado.

El nivel de progresión ascendente o descendente que aplica el sistema de inferencia difuso para adaptar la ganancia y que sea pertinente, se debe a la forma de las funciones de membresías para las variables lingüísticas, las cuales son establecidas con base en el análisis cualitativo del modelo dinámico que incluye al sistema de inferencia difuso, permitiendo observar condiciones en las que garantizan que se obtiene la sincronización [21][22].

Dado que la base de conocimiento expresado en reglas y funciones de membresía tienen relación directa con la manera en que se modifica la dinámica (comportamiento) del sistema seguidor para llevar a cabo la tarea de sincronización con el sistema líder, además de las técnicas de análisis cualitativo, puede

utilizarse para el diseño de los sistemas difusos el conocimiento con base en la experiencia del personal experto en los sistemas a sincronizar, datos históricos de los sistemas y técnicas estadísticas.

Para ilustrar de forma intuitiva el funcionamiento de este esquema con ganancia adaptable, conviene retomar la analogía de la parvada de patos: Imaginemos a un pato seguidor que, por alguna razón, ha quedado muy rezagado respecto al líder de la formación. En esta situación la diferencia entre ambos (el error) es grande, y el pato necesita batir sus alas con mayor fuerza para alcanzar al grupo; en términos del controlador, esto corresponde a una ganancia elevada. A medida que el seguidor se aproxima a su posición en la formación, el error disminuye y ya no requiere el mismo esfuerzo: basta con un aleteo suave para mantenerse en su lugar, lo que equivale a una ganancia baja.

Un controlador con ganancia fija sería incapaz de hacer esta distinción: aplicaría siempre el mismo esfuerzo, desperdiciando energía cuando el pato está prácticamente sincronizado, o resultando insuficiente cuando se encuentra muy lejos. El sistema de inferencia difuso, en cambio, ajusta la ganancia de manera continua siguiendo reglas tan naturales como las descritas: si el error es grande, aumenta el esfuerzo; si el error es pequeño, lo reduce.

Las funciones de membresía son precisamente las que dan forma a esta transición. En lugar de un salto brusco entre "lejos" y "cerca", definen de manera gradual qué tan grande o pequeño se considera el error, y por tanto qué tanto esfuerzo aplicar en cada situación intermedia. Decidir dónde están esos límites (a partir de qué distancia conviene aletear con fuerza, o cuándo basta un ajuste leve) es donde entra el conocimiento experto: la comprensión del comportamiento de los patos (o, de forma más general, la dinámica de los sistemas a sincronizar) puede establecer estas reglas y formas de manera que la sincronización se logre de forma eficiente. De este modo, el seguidor invierte la energía justa en cada momento.

6. Conclusiones

En conclusión, los sistemas difusos son una herramienta poderosa y versátil para modelar y resolver problemas complejos ya que permiten incorporar imprecisión, incertidumbre o conocimiento que no es fácil de incluir con metodologías tradicionales de modelado. En el contexto de la solución del problema de sincronización que aquí se describe, el sistema difuso participa en el rol de controlador apoyando en determinar la ganancia apropiada con base en que tan cercano o lejano está el sistema seguidor para conseguir sincronizarse con el sistema líder. La característica de adaptabilidad en la ganancia del controlador disminuye la necesidad de realizar cambios fuera de línea y permite un aprovechamiento más responsable de los recursos de energía que el sistema seguidor puede requerir para completar la tarea de sincronización.

Utilizar como herramienta las técnicas de análisis cualitativo de sistemas dinámicos permite conocer el comportamiento que tiene el sistema dinámico con base en un modelo matemático, estudiar los comportamientos que se generan cuando se incluye un controlador en el modelo e intervenir con conocimiento de las condiciones que afectan en los comportamientos para dirigirlos o mantenerlos hacia donde se requieren, siendo garantizado desde la etapa de diseño. En el contexto de incluir el Sistema de inferencia difusa en el modelo y analizarlo, permite identificar las relaciones de parámetros de las funciones de membresía en el valor de las ganancias y en la manera en que afecta en la velocidad de la sincronización.

7. Agradecimientos
Este trabajo fue financiado parcialmente por el Tecnológico Nacional de México con los proyectos 24461.26-P, 24952.26-P y 25692.26-P.

8. Referencias

[1] Pikovsky, A., Rosenblum, M., & Kurths, J. (2002). Synchronization: A universal concept in nonlinear science. Cambridge University Press.

[2] Strogatz, S. (2004). Sync: The emerging science of spontaneous order. Hyperion Books.

[3] Chen, G., & Pham, T. T. (2001). Introduction to fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy control systems. CRC Press.

[4] Perko, L. (2013). Differential equations and dynamical systems (3rd ed., Vol. 7). Springer.

[5] Hirsch, M. W., Smale, S., & Devaney, R. L. (2012). Differential equations, dynamical systems, and an introduction to chaos (3rd ed.). Academic Press.

[6] Pereyra, F., Valencia, G., Cazarez, N., López, F., & González, B. (2019). Implementation of a distributed optimal predictive control in a quadruple tank system. IEEE Latin America Transactions, 17(1), 135–146. https://doi.org/10.1109/TLA.2019.8826700

[7] Sousa, J. M. C., & Kaymak, U. (2002). Fuzzy decision making in modelling and control (Vol. 27). World Scientific Publishing.

[8] Gaytan-Reyes, I. G., Cazarez-Castro, N. R., Cardenas-Maciel, S. L., Lara-Ochoa, D. A., & Martinez-Graciliano, A. (2017). Genetic optimization of fuzzy systems for the classification of treated water quality. En Numerical and evolutionary optimization – NEO 2017 (Studies in Computational Intelligence, Vol. 785). Springer.

[9] Prieto, P. J., & Cazarez-Castro, N. R. (2016). Aplicaciones de la inteligencia computacional en el control de robots neumáticos. Komputer Sapiens, I, 11–15.

[10] Wu, J., & Cui, P. (2024). Cooperative adaptive fuzzy control for the synchronization of nonlinear multi-agent systems under input saturation. Mathematics, 12(10), Article 1426. https://doi.org/10.3390/math12101426

[11] Roosileht, M. (2025). Application of fuzzy logic for collaborative robot control. Electronics, 14(20), Article 4029. https://doi.org/10.3390/electronics14204029

[12] Lekkas, S., & Mikhailov, L. (2010). Evolving fuzzy medical diagnosis of Pima Indians diabetes and of dermatological diseases. Artificial Intelligence in Medicine, 50(2), 117–126. https://doi.org/10.1016/j.artmed.2010.05.007

[13] Srivastava, A., Bhanot, D., Jasim, L. H., Varshney, N., & Patil, V. (2025). Advancements in fuzzy logic applications for diagnostic decision support systems in healthcare. Fuzzy Information and Engineering, 17(3), 284–297. https://doi.org/10.26599/FIE.2025.9270064

[14] Ayllon-Lorenzo, P. M., Cardenas-Maciel, S. L., & Cazarez-Castro, N. R. (2017). Applying control theory to optimize the inventory holding costs in supply chains. En Numerical and evolutionary optimization – NEO 2017 (Studies in Computational Intelligence, Vol. 785). Springer. https://doi.org/10.1007/978-3-319-96104-0

[15] Zhu, Z.-Y., Zhao, Z.-S., Zhang, J., Wang, R.-K., & Li, Z.-Q. (2020). Adaptive fuzzy control design for synchronization of chaotic time-delay system. Information

Sciences, 535, 225–241. https://doi.org/10.1016/j.ins.2020.05.056

[16] Márquez-Vera, C. A., Márquez-Vera, M. A., Yakoub, Z., Ma'arif, A., Castro-Montoya, A. J., & Cazarez-Castro, N. R. (2022). Fuzzy state feedback with double integrator and antiwindup for the Van de Vusse reaction. Archives of Control Sciences, 32, 383–408. https://doi.org/10.24425/acs.2022.141720

[17] Chen, G., & Pham, T. T. (2005). Introduction to fuzzy systems. CRC Press.

[18] Pulido-Luna, J. R., López-Rentería, J. A., & Cazarez-Castro, N. R. (2021). Mamdani-type fuzzy-based adaptive nonhomogeneous synchronization. Complexity, 2021, 1–11. https://doi.org/10.1155/2021/6613231

[19] Zaqueros-Martinez, J., Rodriguez-Gomez, G., Tlelo-Cuautle, E., & Orihuela-Espina, F. (2023). Fuzzy synchronization of chaotic systems with hidden attractors. Entropy, 25(3), Article 495. https://doi.org/10.3390/e25030495

[20] Boulkroune, A., Boubellouta, A., Bouzeriba, A., & Zouari, F. (2025). Practical finite-time fuzzy synchronization of chaotic systems with non-integer orders: Two chattering-free approaches. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 34(3), 334–359. https://doi.org/10.1007/s11518-024-5635-7

[21] Helmy, S., Magdy, M., & Hamdy, M. (2022). Control in the loop for synchronization of nonlinear chaotic systems via adaptive intuitionistic neuro-fuzzy: A comparative study. Complex & Intelligent Systems, 8, 3437–3450. https://doi.org/10.1007/s40747-022-00677-x

[22] Wang, R.-M., Zhang, Y.-N., Chen, Y.-Q., Chen, X., & Xi, L. (2020). Fuzzy neural network-based chaos synchronization for a class of fractional-order chaotic systems: An adaptive sliding mode control approach. [18] Helmy, S., Magdy, M., & Hamdy, M. (2022). Control in the loop for synchronization of nonlinear chaotic systems via adaptive intuitionistic neuro-fuzzy: A comparative study. Complex & Intelligent Systems, 8, 3437–3450. https://doi.org/10.1007/s40747- 022-00677-x

[19] Wang, R.-M., Zhang, Y.-N., Chen, Y.-Q., Chen, X., & Xi, L. (2020). Fuzzy neural network-based chaos synchronization for a class of fractional-order chaotic systems: An adaptive sliding mode control approach. Nonlinear Dynamics, 100(2), 1275–1287. https://doi.org/10.1007/s11071-020-05574-x Nonlinear Dynamics, 100(2), 1275–1287. https://doi.org/10.1007/s11071-020-05574-x