

Diseño y Optimización de Controladores Difusos Mediante Evolución Diferencial: Aplicación a un CSTR Isotérmico

M. C. José Cruz Muñoz Esparza¹, Dr. José Enrique Jaime Leal²

Resumen: Garantizar la seguridad y estabilidad de los procesos, así como la calidad del producto final, es una tarea prioritaria en los procesos industriales, a tal punto que puede ser la diferencia entre el éxito y el fracaso de una planta. Por esta razón, la implementación de un sistema de control es esencial para garantizar un funcionamiento deseado en un tren de procesos. Si bien el controlador PID es el esquema de control comúnmente utilizado debido a su versatilidad y simplicidad de uso, su adecuada sintonización puede ser un desafío en procesos complejos y no lineales debido a la necesidad de una representación matemática precisa de la planta. Así, para controlar sistemas cuya modelación o cuantificación es compleja, el enfoque de control difuso ha surgido como una alternativa atractiva en contraparte a los esquemas de control clásicos. En este estudio, se describe la implementación de controladores difusos de tipo Mamdani, Sugeno y Tsukamoto para controlar un reactor CSTR isotérmico, y cuyas dinámicas de control son comparadas con las generadas a través de un controlador PID. Los parámetros de diseño de los controladores se ajustan utilizando el algoritmo de optimización estocástica Evolución Diferencial. En el análisis de resultados estos muestran que, en determinadas condiciones de operación, los controladores difusos ofrecen un mejor rendimiento que el controlador PID.

Palabras clave: Control Difuso, Mamdani, Sugeno, Tsukamoto, Evolución Diferencial, CSTR isotérmico.

Introducción

Los procesos industriales son cada vez más complejos: interactúan con múltiples variables y son altamente no lineales, provocando una marcada dificultad para mantener una operación deseada del sistema cuando se presenta alguna perturbación. Esto, a su vez, impacta negativamente en la calidad del producto final, los costos de operación y la seguridad del equipo. Por esta razón, es necesario incorporar un esquema de control que garantice la estabilidad y la seguridad del sistema ante cualquier perturbación típica que se pueda presentar. El control PID (proportional-integral-derivative controller, en inglés) es un esquema ampliamente utilizado debido a su simplicidad y alta capacidad para adaptarse a casi cualquier proceso industrial. Sin embargo, su robustez sigue estando en función de una adecuada sintonización de sus parámetros y donde para ello se requiere de una representación matemática precisa de la planta, aunado a que en sistemas complejos su confiabilidad puede verse comprometida y donde la experiencia de los operadores humanos es desaprovechada bajo este enfoque de sintonización (Sharma et al., 2014). Por esto último, los esquemas de control difusos se han vuelto una alternativa atractiva en los últimos años para ser implementados en este tipo de sistemas complejos. Particularmente, el controlador difuso tipo Mamdani ha sido utilizado para el control de procesos diversos y que ha sido abordado en los trabajos de Gulati y Ashok (2022), Miranda et al. (2021) y Prvulovic et al. (2022). Por su parte, el controlador difuso tipo Sugeno se ha aplicado en trabajos reportados por Qais et al. (2022), Civelek (2020) y Pidikiti et al. (2023). El controlador de tipo Tsukamoto se ha utilizado en las investigaciones llevadas a cabo por Nag y Lee (2019), Yonezawa et al. (2022) y Dore et al. (2023).

Es importante mencionar que los controladores difusos capturan la experiencia del operador mediante un conjunto de reglas SI-ENTONCES que relacionan las variables de entrada y salida del sistema de control utilizando conceptos de lógica difusa, conjuntos difusos y razonamiento difuso (Kala y Deepakrai, 2014). Los controladores difusos se clasifican según su método de inferencia, pudiendo ser de tipo Mamdani (FLCM) propuesto por Mamdani y Assilian (1975), Takagi-Sugeno (FLCS) propuesto por Takagi y Sugeno (1985) y Tsukamoto (FLCT) desarrollado por Tsukamoto (1993).

La incorporación de controladores difusos tiene especial importancia en situaciones donde las variables involucradas en un sistema son difíciles de medir o bien, donde el proceso de modelación carece de una aceptable precisión matemática. Bajo este enfoque, la experiencia de un operador humano puede ser aprovechada para el diseño de los controladores difusos. Además, estos controladores son confiables ante perturbaciones y ruido en las mediciones y pueden manejar múltiples entradas y salidas.

Adicionalmente, los controladores difusos son versátiles ante la tarea de sintonización a través del uso de herramientas de optimización estocástica como se ha hecho en Solihin (2020) y Patel y Shah (2022). Así, a través de

¹ M. C. José Cruz Muñoz Esparza es estudiante de doctorado del programa Doctorado en Ciencias de la Ingeniería del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes. 450fausto@gmail.com (autor corresponsal)

² Dr. José Enrique Jaime Leal es profesor en el departamento de Ingeniería Química del Tecnológico Nacional de México/Instituto Tecnológico de Aguascalientes.

esta práctica, es posible conocer el mejor desempeño posible de un controlador difuso para un proceso determinado. En este estudio en particular, se utilizan controladores difusos de tipo Mamdani, Sugeno y Tsukamoto para controlar un sistema de un reactor tanque de mezcla continua (CSTR) isotérmico y sus dinámicas de control generadas son evaluadas y comparadas con respecto al desempeño que ofrece un controlador PID. La sintonización de los parámetros de ajuste de cada esquema de control es amigable a la optimización por su diseño, y esta se lleva a cabo mediante la herramienta de optimización global estocástica denominada Evolución Diferencial presentada por Storn y Price (1997) y utilizando el índice integral del error absoluto (IEA) como función objetivo a minimizar durante la etapa de optimización.

Metodología

Materiales, Equipo, Sistemas, Programas Computacionales Utilizados

Para la realización de este estudio, se contó con una computadora de escritorio con un procesador Intel Core i7 con 32 GB de RAM. En esta computadora se corrió el programa MATLAB 2017 para la solución del sistema de ecuaciones diferenciales y la simulación del controlador difuso.

Metodología o procedimiento

Los controladores difusos son diseñados teniendo en cuenta las consideraciones hechas por Braae y Rutherford (1979) y que se fundamentan partiendo de la Figura 1. Así, se establece que la función de membresía para la variable lingüística “Error Negativo” alcanza su valor máximo de uno, a la vez que la variable lingüística “Error Nulo” alcanza su valor mínimo de cero. Esto traduce que la mayor certeza de que el error es negativo implica la mayor certeza de que el error no es nulo. Lo mismo ocurre entre las variables lingüísticas “Error Nulo” y “Error Positivo”. Entonces, las variables de diseño x_1 y x_2 pueden determinar las tres variables lingüísticas que describen al error. Bajo este mismo enfoque se diseñan las variables lingüísticas del cambio en el error que se muestran en la Figura 2 y en la acción de control que corresponde a la Figura 3. Las Figuras 1-3 corresponden al controlador difuso tipo Mamdani.

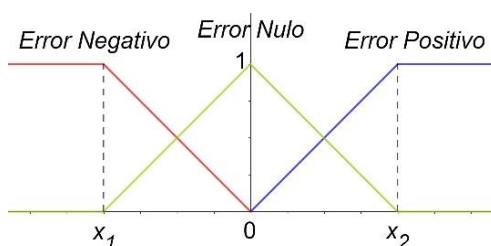


Figura 1. Parte antecedente, interpretación del error

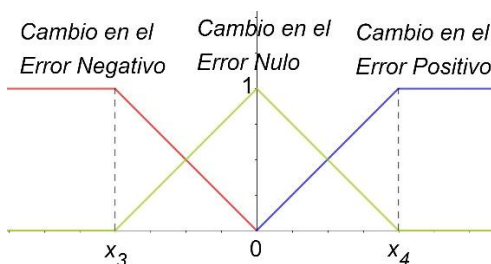


Figura 2. Parte antecedente, interpretación del cambio en el error

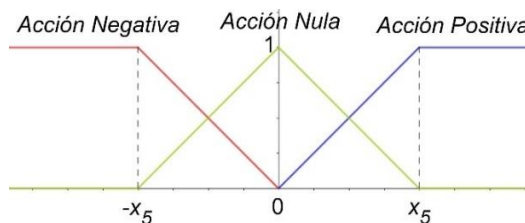


Figura 3. Parte consecuente FLCM

Por su parte, para el controlador difuso tipo Takagi-Sugeno, se parte del diseño de las Figuras 1-2 para la parte antecedente, esto asumiendo que $x_1=-x_2$ y $x_3=-x_4$. En el diseño de la parte consecuente se toman en cuenta las Ec. 1 y 2, donde las variables de diseño son los parámetros m_1, m_2 y b ; mientras que e y Δe corresponden a ser el error y el del error calculados mediante las Ec. 3 y 4, respectivamente. Por último, para el diseño del controlador difuso tipo Tsukamoto, la parte antecedente es similar que para el de tipo Mamdani, la diferencia radica en la parte consecuente, representada por la Figura 4.

$$f_n(e, \Delta e) = m_1 e + m_2 \Delta e + b \tag{Ec. 1}$$

$$f_p(e, \Delta e) = m_1 e + m_2 \Delta e - b \tag{Ec. 2}$$

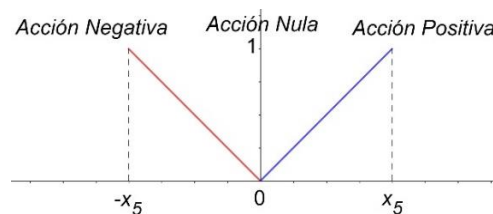


Figura 4. Parte consecuente FLCT

El diseño de la base de reglas se lleva a cabo tomando en cuenta la dinámica hipotética de la variable controlada, una vez que existe una perturbación. Como se muestra en la Figura 5, cuando la variable controlada se encuentra sobre el valor deseado (*set point*) el error definido por la Ec. 3 es negativo, y esto implica la necesidad de una acción de control negativa para reducir el valor de la variable manipulada. Sin embargo, cuando el error es positivo, es necesario aplicar una acción positiva que significa aumentar el valor de la variable manipulada. A su vez, el cambio en el error tiene especial importancia cuando el error es nulo. Volviendo a la Figura 5, en la primera intersección de la variable controlada y el *set point* marcada por el punto P_1 se puede observar que, aunque en ese punto el error es nulo, la dinámica llevará al error a valores positivos y esto se puede pronosticar gracias al cambio en el error definido por la Ec. 4. Si este cambio en el error es grande, la dinámica de la variable manipulada conducirá a un error positivo. Partiendo de esta información, entonces es necesario aplicar una acción positiva antes de que el error sea positivo. La medida del cambio en el error da cualidades de predicción al controlador difuso.

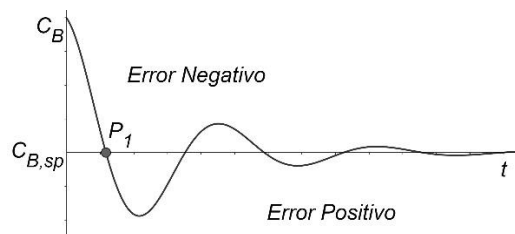


Figura 5. Comportamiento hipotético del sistema ante una perturbación de carga

$$e(t) = C_{B,sp} - C_B(t) \tag{Ec. 3}$$

$$\Delta e(t) = e(t) - e(t - \Delta t) = C_B(t - \Delta t) - C_B(t) \tag{Ec. 4}$$

Así, puesto que la salida del controlador difuso corresponde al aumento en la acción de control, esto está representado por:

$$f(e, \Delta e; x) = \Delta u \tag{Ec. 5}$$

donde Δu corresponde al cambio en la variable manipulada que es aplicado y, por ende, la acción de control estará definida por:

$$u(t) = u(t - \Delta t) + \Delta u \quad (\text{Ec. 6})$$

Por su parte, la base de reglas consta de nueve reglas, las cuales son:

- Si el *error* es **negativo** y el *cambio en el error* es **negativo** entonces la *acción* es **negativa**
- Si el *error* es **negativo** y el *cambio en el error* es **nulo** entonces la *acción* es **negativa**
- Si el *error* es **negativo** y el *cambio en el error* es **positivo** entonces la *acción* es **nula**
- Si el *error* es **nulo** y el *cambio en el error* es **negativo** entonces la *acción* es **negativa**
- Si el *error* es **nulo** y el *cambio en el error* es **nulo** entonces la *acción* es **nula**
- Si el *error* es **nulo** y el *cambio en el error* es **positivo** entonces la *acción* es **positiva**
- Si el *error* es **positivo** y el *cambio en el error* es **negativo** entonces la *acción* es **nula**
- Si el *error* es **positivo** y el *cambio en el error* es **nulo** entonces la *acción* es **positiva**
- Si el *error* es **positivo** y el *cambio en el error* es **positivo** entonces la *acción* es **positiva**

Expuesta la base de reglas con que se fundamenta la operación de cada uno de los controladores difusos, estos se aplican a una variante del caso de estudio propuesto por Bequette (2002), que corresponde a un sistema de un reactor tanque de mezcla continua (CSTR) isotérmico definido por las ecuaciones diferenciales descritas por las Ec. 7 y 8.

$$\frac{dC_A}{dt} = u(C_{Af} - C_A) - k_1 C_A - k_3 C_A^2 \quad (\text{Ec. 7})$$

$$\frac{dC_B}{dt} = -u C_B + k_1 C_A - k_2 C_B \quad (\text{Ec. 8})$$

donde C_A representa la concentración del reactivo A, C_B es la concentración del reactivo B y también es la variable controlada. Las constantes de velocidad para la reacción química se denotan como k_1 , k_2 y k_3 . La variable C_{Af} es la concentración del reactivo A en la alimentación, mientras que u es el coeficiente de dilución, que también actúa como variable manipulada y está limitado a valores entre 0.1 y 0.9 min^{-1} .

Se plantea el escenario 1 en el que el controlador comienza a operar después de una disminución de 2.5 unidades en la concentración de la alimentación. Después de 5 minutos, la concentración de la alimentación se estabiliza, lo que da lugar a la primera y segunda perturbación, respectivamente. Se realizan pruebas con los mismos diseños de los controladores en un escenario para el cual no fueron entrenados. En este segundo escenario (escenario 2), la caída en la concentración de la alimentación es de 3 unidades, esto impide que el sistema alcance una dinámica deseada debido a las restricciones en la variable manipulada. Sin embargo, después de 5 minutos, la concentración en la alimentación se estabiliza nuevamente, permitiendo volver al valor de operación deseado. Este caso permite demostrar la capacidad de los controladores para manejar la saturación en la variable manipulada. A modo de referencia y que servirá como base comparativa, se utiliza un controlador PID definido por Ec. 9.

$$u(\tau) = K_p e(\tau) + K_I \int_0^\tau e(t) dt + K_D \left. \frac{de(t)}{dt} \right|_{t=\tau} \quad (\text{Ec. 9})$$

donde K_p , K_I y K_D , corresponden a las ganancias proporcional, integral y derivativa del esquema de control y que a su vez son los parámetros de ajuste del mismo.

Todos y cada uno de los parámetros de los controladores implementados fueron sintonizados mediante una herramienta de optimización estocástica denominada Evolución Diferencial. Dicho algoritmo operó llevando a cabo 100 pruebas de 100 iteraciones cada una y con una población de 20 individuos. La función objetivo a minimizar y que fue implementada corresponde al índice de desempeño que mide la integral del error absoluto (IEA) durante el tiempo de funcionamiento del controlador, T , tal como se plantea en Ec. 10.

$$IEA = \int_0^T |e(t)| dt \quad (\text{Ec. 10})$$

Análisis y Resultados

Desarrolladas las simulaciones para cada uno de los esquemas de control, los resultados fueron analizados y se ubicaron los valores de los parámetros de ajuste óptimos para cada controlador: en la Tabla 1 se presentan los parámetros optimizados para el controlador PID; en la Tabla 2, los parámetros de los controladores difusos FLCM y FLCT; y en la Tabla 3, los parámetros optimizados para el FLCs. Estos fueron obtenidos tras minimizar el índice de

desempeño IEA. Asimismo, en la Tabla 4 se muestran los valores del índice IEA obtenidos para cada uno de los controladores evaluados y en cada uno de los dos escenarios que se abordaron para el sistema.

Tabla 1. Parámetros óptimos del controlador PID

	K_P	K_I	K_D
PID	0.95781	2.9707	0.046056

Tabla 2. Parámetros óptimos de los controladores difusos tipo Mamdani y Tsukamoto

	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5
FLCM	4.7484	0.17224	0.88508	1.5295	0.26674
FLCT	0.90759	0.95468	8.5444E-02	0.91442	4.4972

Tabla 3. Parámetros óptimos del controlador difuso tipo Takagi-Sugeno

	x_1	x_3	m_1	m_2	b
FLCS	1.7944E-03	4.6491E-04	0.34220	0.72728	1.9051E-04

Tabla 4. Índices IEA para el escenario 1 (E1) y el escenario 2 (E2)

	E1	E2
PID	0.23665	1.6206
FLCM	0.26389	0.90377
FLCS	0.29656	0.98098
FLCT	0.25261	0.98804

A partir de la obtención de los parámetros de ajuste óptimos, se generaron las dinámicas de control de cada esquema y fueron comparadas entre sí con el objetivo de visualizar y determinar aquellas que mejoran la controlabilidad del sistema en cada uno de los escenarios propuestos.

Partiendo del escenario 1 del problema y que anteriormente se describió, la comparativa de las dinámicas de control obtenidas entre un sistema controlado por un controlador PID y un FLCM son mostradas en la Figura 6. En esta tras la primera perturbación, ambos controladores alcanzan una dinámica de control de forma casi idéntica, mientras que en la segunda perturbación, si bien ambos controladores logran estabilizar el sistema casi al mismo tiempo, el esquema difuso presenta menos oscilaciones. Basándose en el tiempo necesario para alcanzar la estabilidad ambos controladores compiten y son similares en robustez.

Por otra parte, en el comparativo entre controladores PID y FLCS, el cual se ilustra en la Figura 7, se observa que ambos esquemas logran estabilizar el sistema de forma similar tras la primera perturbación. Sin embargo, en la segunda perturbación, ambos esquemas generan oscilaciones indeseables antes de la estabilización, la cual ocurre en un tiempo similar para ambos esquemas de control.

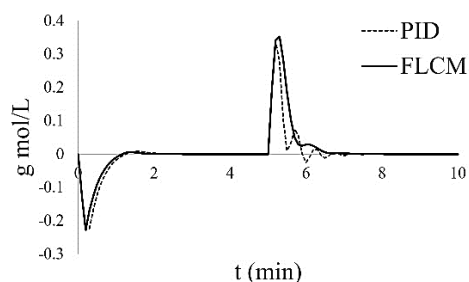


Figura 6. Control de la concentración con un controlador PID y un FLCM

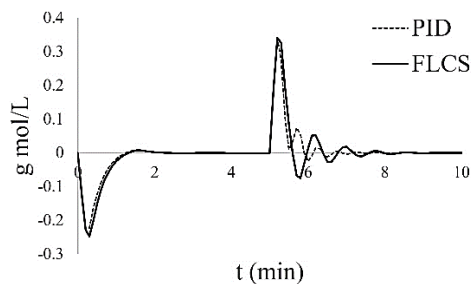


Figura 7. Control de la concentración con un controlador PID y un FLC.

Finalmente, en el comparativo de dinámicas entre los esquemas PID y el FLCT, y que se muestra en la Figura 8, se denota que se alcanza una dinámica de control superior por parte del FLCT ya que demanda un menor tiempo para lograr la estabilidad del sistema y bajo una generación casi nula de oscilaciones en ambas perturbaciones en comparación con el PID. Asimismo, este esquema de control FLCT supera en ambos aspectos a los esquemas FLCM y FLCs en el escenario 2.

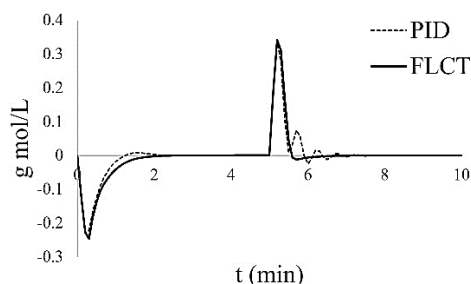


Figura 8. Control de la concentración con un controlador PID y un FLCT.

En una segunda parte de este estudio y que es correspondiente al escenario 2 descrito previamente, se realizaron las pruebas de evaluación de los mismos sistemas de control en un escenario donde no es posible alcanzar el punto de operación deseado en la dinámica del sistema. Al analizar la comparativa entre las dinámicas de control obtenidas, representadas en las Figuras 9 a 11, se observa en todos los casos, ante la primera perturbación, los controladores tienen un desempeño similar. Sin embargo, una vez que se estabiliza la concentración de alimentación, y se presenta la segunda perturbación, el controlador PID muestra un sobre impulso significativo debido a la saturación en la acción de control, por su parte los controladores difusos experimentan un sobre impulso de menor magnitud ocasionado por el aumento repentino en la concentración de alimentación. A pesar de esto, los esquemas difusos presentan una mejor dinámica de control en comparación con el PID. En el caso específico del FLCM y el FLCs, ambos logran un rendimiento muy similar al que se observó cuando la caída de concentración en la alimentación fue de 2.5 unidades. Por otro lado, el FLCT logra mantener la estabilidad, pero con un error casi constante en relación con el punto de operación deseado. Este error se debe a que la dinámica del proceso alcanza un valor que el controlador considera como un error cero, lo que deriva en una convergencia lenta hacia el punto de operación deseado.

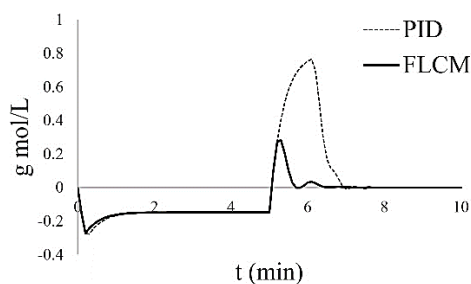


Figura 9. Control de la concentración con un controlador PID y un FLCM

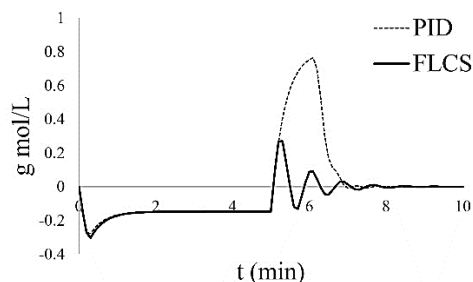


Figura 10. Control de la concentración con un controlador PID y un FLCS

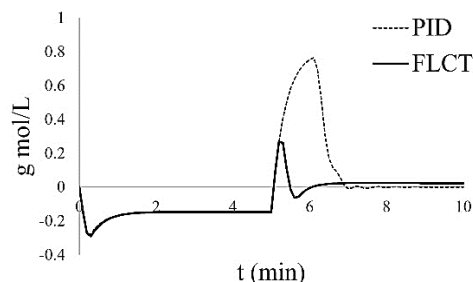


Figura 11. Control de la concentración con un controlador PID y un FLCT

En concordancia con los resultados expuestos, el control difuso se presenta como una opción confiable y robusta para la controlabilidad de sistemas en comparativa con el control PID, incluso en situaciones para las cuales los controladores no fueron específicamente entrenados, como fue el segundo escenario. Si bien los controladores difusos presentan un mayor número de parámetros de ajuste en comparación con el controlador PID (5 parámetros de diseño para los controladores difusos y 3 para el PID), esta diferencia se compensa con la accesibilidad en la sintonización de tales parámetros, requiriéndose pocas iteraciones para obtener resultados favorables. Tomando esto último en consideración, es importante señalar que el algoritmo de optimización estocástico utilizado (Evolución Diferencial) demostró un comportamiento fiable en el ajuste de los parámetros de todos los esquemas de control implementados en este estudio y bajo una demanda computacional mínima. Con ello se puede establecer que la aplicación de esquemas de control difusos mejora las dinámicas de control en comparación con los esquemas clásicos y que, bajo la implementación de herramientas numéricas de tipo estocástico, la sintonización de los parámetros de ajuste es versátil, confiable y bajo una mínima demanda computacional.

Conclusiones

En este estudio, se han presentado y analizado los resultados de la implementación de diferentes esquemas de control. Nuestros hallazgos respaldan la idea de que el control difuso representa una opción confiable y robusta en comparación con el controlador clásico, incluso en situaciones en las que los controladores difusos no han sido específicamente entrenados. Además, tanto el diseño de los controladores difusos como la utilización de herramientas numéricas de tipo estocástico, como Evolución Diferencial, permite lograr una sintonización versátil y confiable de los parámetros de ajuste, manteniendo una baja carga computacional. Los resultados obtenidos en este estudio respaldan la eficacia y eficiencia del control difuso, proporcionando una alternativa sólida y de alto rendimiento al control clásico en diferentes situaciones y escenarios de aplicación.

Recomendaciones

Al término del presente estudio, puede definirse que, con el fin de mejorar el rendimiento y la confiabilidad de los controladores difusos, se sugiere aumentar el número de reglas. Sin embargo, debe tenerse en cuenta que esto incrementaría su complejidad, lo que derivaría en un mayor número de parámetros, costo computacional y riesgo de sobre-ajuste. Particularmente, en este estudio, se optó por reducir el número de parámetros de ajuste en el diseño de los controladores difusos, esto con el fin de simplificar el proceso de ajuste de parámetros bajo el enfoque de optimización con un mínimo de iteraciones.

Limitaciones

Dentro del desarrollo del estudio fue necesario simular el controlador difuso para que aceptara los parámetros de diseño y permitiera hacer iteraciones con estos valores. Esto se logró con el controlador difuso que ofrece MATLAB,

sin embargo, el tiempo de compilación entre componentes disparó el tiempo de cómputo. Por esta razón, se recurrió a programar el controlador difuso en MATLAB para que funcionara dentro del procedimiento de Runge-Kutta-Fehlberg utilizado para resolver las ecuaciones diferenciales. De esta manera, el controlador difuso otorga una salida que obtiene de forma analítica (y no numérica como hace el controlador difuso de MATLAB) reduciendo sustancialmente el tiempo de cómputo. El procedimiento de Runge-Kutta-Fehlberg también fue programado por los autores de forma que funcionara para este problema en particular. Los autores tienen conocimiento de que el diseño, sintonización y aplicación del controlador difuso puede llegar a ser muy complicado, especialmente para los ingenieros que no están muy familiarizados con los controladores difusos. El conocimiento de esta situación fue lo que motivó esta investigación, pero si el ingeniero interesado quisiera profundizar más en los controladores difusos, entonces los autores recomiendan programar algún procedimiento Runge-Kutta y el controlador difuso para evitar tiempos de cómputo excesivamente largos.

Referencias

- Bequette B. W. (2002). "Process Control: Modelling, Design and Simulation". Prentice Hall PTR.
- Braae M. and Rutherford D. A. (1979). "Selection of parameters for a fuzzy logic controller". *Fuzzy sets and systems* 2. pp 185-199.
- Civelek Z. (2020). "Optimization of fuzzy logic (Takagi-Sugeno) blade pitch angle controller in wind turbines by genetic algorithm". *Engineering Science and Technology, an International Journal* 23(1).
- Dore P., Chakkor S., El Oualkadi A. and Baghoury M. (2023). "Real-time intelligent system for wind turbine monitoring using fuzzy system". *e-Prime - Advances in Electrical Engineering, Electronics and Energy* 3.
- Gulati S. and Ashok Pal A. (2022). "Tuning fuzzy logic controller with SGWO for river water quality modelling". *Materials Today: Proceedings* 54(3). pp 733-737.
- Kala H. y Deepakraj D., (2014) "Performance Evaluation of Fuzzy Logic and PID Controller for Liquid Level Process". *International journal of innovative research in electrical, electronics, instrumentation and control engineering* 2. pp 1311-1314.
- Mamdani E. H. and Assilian S. (1975). "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller". *Int. J. Man-Machine studies* 7. pp 1-13.
- Miranda C. R., De Campos P. V. and Ribeiro M. V. (2021). "Energy reliability in macro base stations: A feasible solution based on a type-1 Mamdani fuzzy system". *Electric Power Systems Research* 195.
- Nag S. and Lee K. Y. (2019). "Optimized Fuzzy Logic Controller for Responsive Charging of Electric Vehicles". *IFAC-PapersOnLine* 52(4).
- Patel H. R. and Shah V. A. (2022). "Fuzzy Logic Based Metaheuristic Algorithm for Optimization of Type-1 Fuzzy Controller: Fault-Tolerant Control for Nonlinear System with Actuator Fault". *IFAC-PapersOnLine* 55(1).
- Pidikiti T., Shreedevi, Gireesha B., Subbarao M. and Murali Krishna V. B. (2023). "Design and control of Takagi-Sugeno-Kang fuzzy based inverter for power quality improvement in grid-tied PV systems". *Measurement: Sensors* 25.
- Prvulovic S., Mosorinski P., Radosav D., Tolmac J., et al. (2022). "Determination of the temperature in the cutting zone while processing machine plastic using fuzzy-logic controller (FLC)". *Ain Shams Engineering Journal* 13(3).
- Qais M. H., Hasanien H. M. and Alghuwainem S. (2022). "Whale optimization algorithm-based Sugeno fuzzy logic controller for fault ride-through improvement of grid-connected variable speed wind generators". *Engineering Applications of Artificial Intelligence* 87.
- Sharma K. D., Ayyub M., et al. (2014). "Advanced Controllers Using Fuzzy Logic Controller (FLC) for Performance Improvement". *International Electrical Engineering Journal* 5. pp 1452- 1458.
- Solihin M. I., Chuan C. Y. and Astuti W. (2020). "Optimization of fuzzy logic controller parameters using modern meta-heuristic algorithm for gantry crane system (GCS)". *Materials Today: Proceedings* 29(1).
- Storn R. and Price K. (1997). "Differential evolution –a simple and efficient heuristic for global optimization over continuous spaces". *Journal of Global Optimization* 11. pp 341–359.
- Takagi T. and Sugeno M. (1985). *Fuzzy identification of systems and its applications to modeling and control*. IEEE transactions on systems, man, and cybernetics 15. pp 116-132.
- Tsukamoto, Y. (1993). "An approach to fuzzy reasoning method". *Readings in fuzzy sets for intelligent systems*.
- Yonezawa H., Yonezawa A., Hatano T. et al. (2022). "Fuzzy-reasoning-based robust vibration controller for drivetrain mechanism with various control input updating timings". *Mechanism and Machine Theory* 175.