

Técnicas de Lógica Difusa en Ingeniería de Control

Fuzzy Logic Techniques in Control Engineering

Arnaldo Matute¹, William Bernal Suárez²

Universidad Antonio Nariño – Sede Tunja, Boyacá, Colombia, Grupo de Investigación BINA, Facultad de Ingeniería, Fundación Universitaria Juan de Castellanos, Tunja Colombia.
arnaldo.matute@uan.edu.co

Recibido / Received: 20-10-2016 – Aceptado / Accepted: 10-02-2017

Resumen

Se entiende por lógica difusa la forma de representar matemáticamente, razonamientos e ideas imprecisas o aproximadas. Se basa en relaciones de entrada-salida representadas en un compendio de reglas difusas, que son expresiones lingüísticas que asocian una causa con un efecto. Su versatilidad la ha hecho apta para la solución de problemas de seguimiento de referencia en ingeniería de control, donde ha mejorado el desempeño de controladores para sistemas no necesariamente lineales e invariantes en el tiempo. En su teoría, se estudian distintos esquemas de control en los cuales la lógica difusa desempeña un papel determinante en su condición de control adaptivo. También, la capacidad que tienen los sistemas de inferencia difusa (SID) para la identificación de sistemas dinámicos, aporta soluciones a esquemas de control que contemplan modelos de referencia. Así, las técnicas de lógica difusa en ingeniería de control han sido un alternativa exitosa en los esfuerzos dirigidos a mejorar el rendimiento de sistemas de control ante no linealidades, variabilidad de parámetros y situaciones en las cuales la información del proceso a controlar es impreciso o poco conocido.

Palabras clave: lógica difusa, sistema de inferencia difusa, regla difusa, controlador difuso.

Abstract

Fuzzy logic is understood as the way to represent reasoning and inaccurate or approximate ideas mathematically. It is based in input-output represented in a fuzzy rules set, which are linguistic expressions that associate causes with effects. Their versatility has made it suitable for solving reference following problems in control engineering, where have improved the performance of controllers for systems which are not necessarily linear and time invariant. In their theory several control schemes are studied in which fuzzy logic plays a determining role in its condition of adaptive control. Also, the capability fuzzy inference systems (FIS) have for dynamic systems identification contributes with solutions to control schemes that include reference models. Thus, fuzzy logic techniques in control engineering have been a successful alternative to aimed endeavors to improve performance of control systems towards nonlinearities, parameter variability and situations in which the process to control is inaccurate or not well known.

Keywords: fuzzy logic, fuzzy inference systems, fuzzy rules, fuzzy controller.

INTRODUCCIÓN

El presente artículo de reflexión presenta distintas técnicas de lógica difusa que se aplican en ingeniería de control. Constantemente, se contrastan con los conceptos conocidos del control clásico y se establece el marco de situaciones de control en las cuales el uso de esquemas que contemplen técnicas de lógica difusa ha mejorado el desempeño del lazo cerrado de control. Luego de la presente introducción, en la sección II se expone el concepto de lógica difusa y los fundamentos básicos de la teoría de conjuntos difusos para la posterior comprensión de las reglas difusas (Sección III) y del funcionamiento de los sistemas de inferencia difusa (SID) (sección IV). En la sección V, se reflexiona sobre cómo diseñar sistemas de inferencia difusa para que operen como controladores de un sistema de segundo orden. La sección VI presenta esquemas de control en los cuales las técnicas de lógica difusa están presentes para mejorar su rendimiento. Posteriormente, se dedica una sección, la VII, a la identificación difusa y a su pertinencia en esquemas de control con modelo de referencia. La sección VIII reflexiona sobre las ventajas que representa lo antes expuesto en situaciones de control específicas, para culminar con las respectivas conclusiones en la sección IX y con las referencias bibliográficas en la sección X.

LÓGICA DIFUSA

Se entiende por lógica difusa la forma de representar matemáticamente, razonamientos e ideas imprecisas o aproximadas. En ella, predomina el significado y esencia de un evento por encima de su descripción precisa. Fue postulada por el matemático Lotfi A. Zadeh (Bakú, 1921). En la teoría de conjuntos difusos, un elemento pertenece a un conjunto en cierto grado, de tal modo que puede estar parcialmente ausente o presente. Se diferencia de la lógica concreta en el hecho de que en esta, la pertenencia y la ausencia de un elemento a un conjunto son mutuamente excluyentes. El grado de pertenencia o función de membresía es una función habitualmente continua, no necesariamente derivable que devuelve el grado en el cual cierto elemento pertenece a un conjunto (valor de la verdad). Este está comprendido entre

cero y uno, siendo cero para la ausencia absoluta de tal elemento en tal conjunto; y uno, para la pertenencia absoluta. De tal modo, se representa matemáticamente esa pertenencia parcial posible en la teoría de conjuntos difusos [1].

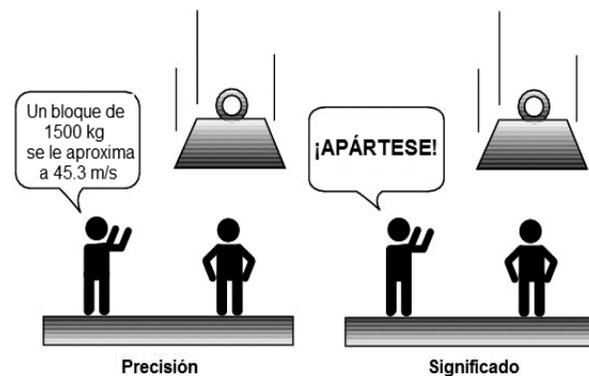
REGLAS DIFUSAS

Una regla difusa es una expresión lingüística que refleja una causa y un efecto. Su calidad de difusa radica en el hecho de que emplea adjetivos imprecisos y relativos:

Si X pertenece a A, entonces Y pertenece a B
 Donde X y Y, son elementos; y, A y B, conjuntos difusos. Unos ejemplos de reglas difusas pueden ser:

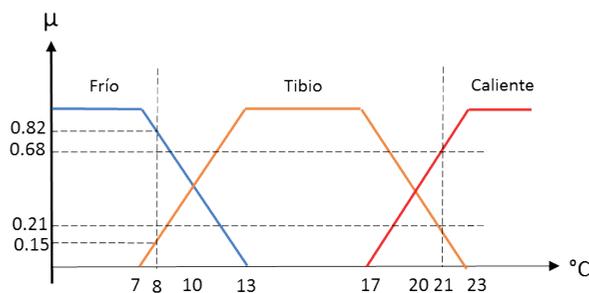
- Si la temperatura es FRÍA, entonces el flujo de combustible es ALTO.
- Si el ciclo de trabajo es GRANDE, entonces la tensión es ALTA.
- Si la velocidad es ALTA, entonces la frenada es FUERTE.

En tales ejemplos, las variables “temperatura”, “ciclo de trabajo” y “velocidad” son partícipes en la causa, lo que puede verse como entradas al sistema y pudieran pertenecer a conjuntos difusos como “BAJO”, “GRANDE”, “ALTO”; respectivamente. Las variables “flujo de combustible”, “tensión” y “frenada”, son también elementos que serían “variables de salida” pertenecientes, en cierto grado, a conjuntos difusos “ALTO” o “FUERTE” [2].



Fuente: Referencia [3]
 Figura 1. Precisión vs. Significado.

En la figura 2, para la variable temperatura, se tiene que los 8 °C pertenecen al conjunto difuso “frío” en un grado de 0.82, pero también pertenece al conjunto difuso “tibio” en 0.15. De modo que, las reglas difusas en la que se establecen conclusiones para cuando la temperatura es “fría” o “tibia”, estas contribuirán de manera ponderada a la salida del sistema cuando la entrada es 8 °C. Equivalentemente, la figura también refleja que decir que 21 °C es “caliente” es verdad en un 68 %, pero decir que es tibio también es verdad en un 21 %.



Fuente: Referencia [4]

Figura 2. Universo de discurso para la variable “Temperatura”

SISTEMAS DE INFERENCIA DIFUSA

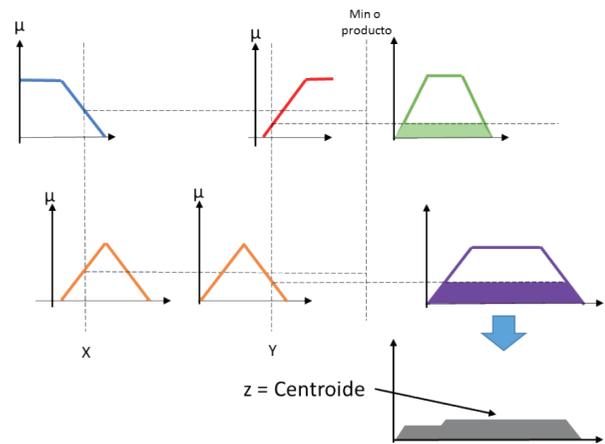
Un sistema de inferencia difusa (SID) consta de, en primera instancia, una etapa de fuzzificación en el cual se calculan los valores de la verdad para cada una de las entradas. Posteriormente, se relacionan estas en un proceso de agregación, que no es más que la intersección y/o unión de dos o más conjuntos difusos mediante operadores llamados T-norma o T-conorma. Finalmente, se realiza la llamada defuzzificación para obtener un valor concreto a la salida. En general, los sistemas de inferencia difusa son mapeadores universales no lineales que, sin embargo, requieren operaciones intermedias lineales. A continuación, se describen los tipos de sistemas de inferencia difusos más conocidos:

Mamdani: calcula el valor de la verdad para cada entrada del sistema. El mínimo entre ellos o su producto, son las T-normas que se suelen emplear. Para la defuzzificación, se considera la función de membresía cortada a nivel del valor de la T-norma. La

salida concreta es el centroide de esta figura que se ha formado como lo muestra la figura 3.

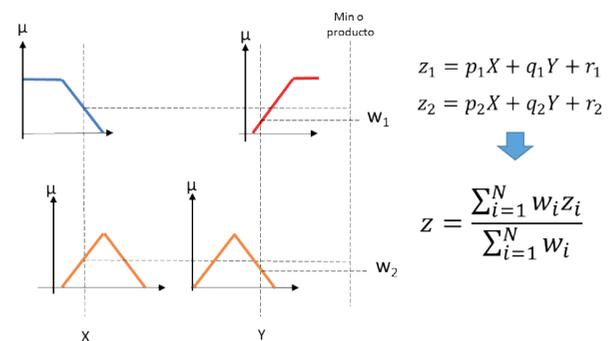
Takagi-Suegno: se trata de un SID que mejoró a Mamdani en cuanto a su menor procesamiento computacional. No considera funciones de membresía para la salida, sino combinaciones lineales concretas de los valores de entrada. La salida concreta es un promedio ponderado entre los resultados de las combinaciones lineales de salida y los valores arrojados por la T-norma. La figura 4 muestra gráficamente en qué consiste.

Tsukamoto: en este caso, como en Mamdani, se consideran funciones de membresía de salida siempre inyectivas, ya que debe conseguirse la pre-imagen del valor de la T-norma. Estas se promediarán luego ponderadamente para obtener una salida concreta como lo muestra la figura 5 [4].



Fuente: Referencia [4]

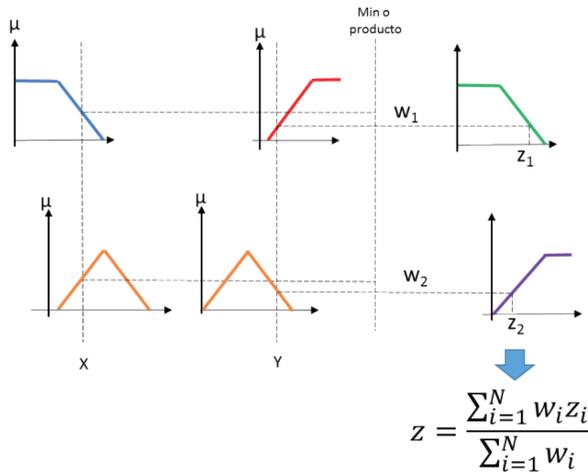
Figura 3. Sistema de inferencia difusa tipo Mamdani.



Fuente: Referencia [4]

Figura 4. Sistema de inferencia difusa tipo Takagi-Sugeno.

DISEÑO DE UN CONTROLADOR DIFUSO

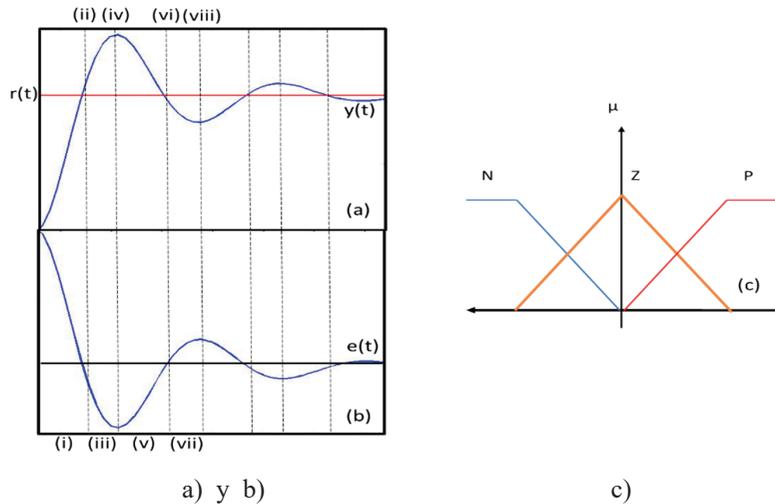


Fuente: Referencia [5]

Figura 5. Sistema de inferencia difusa tipo Tsukamoto.

A continuación, se procede a analizar la respuesta típica de un sistema de segundo orden, con lo que se pretende diseñar un controlador capaz de acondicionar la respuesta a que se aproxime, tanto como sea posible, a una referencia dada. Esto se muestra en la figura 6a. La figura 6b muestra el error $e(t)$, definido como la diferencia entre la referencia $r(t)$ y la respuesta $y(t)$.

Se propone un universo de discurso para la variable error, en el cual se definen tres conjuntos difusos: “N” para valores lejanos a cero por la zona negativa, “Z” para valores cercanos a cero y “P” para valores lejanos a cero por la zona positiva. Nótese que la calidad de difuso de estos conjuntos radica en los adjetivos “cercano” y “lejano” a cero.

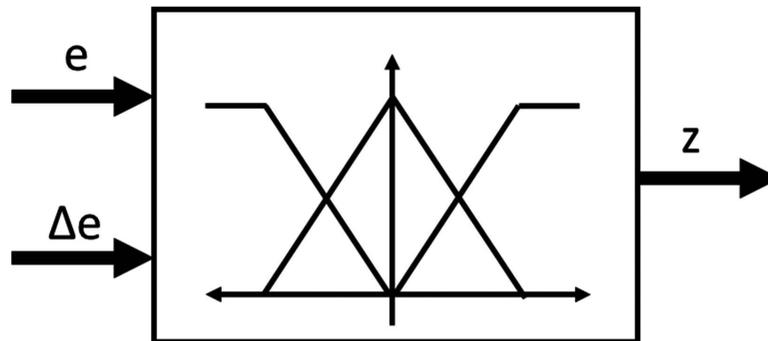


Fuente: Referencia [5]

Figura 6. (a) Respuesta al escalón típica de un sistema de segundo orden. (b) Error definido como la diferencia entre la referencia y la respuesta. (c) Universo de discurso y funciones de membresía para las variables “error” y “cambio del error”.

Se propone crear un sistema de inferencia difuso en el cual se establezca un compendio de reglas difusas sobre las variables “error (e)” y “cambio del error (Δe)”, con salida “z” como se muestra en la figura 7. El proceso de establecer las premisas de las reglas difusas, es bastante directo: no es más que la combinatoria de conjuntos difusos para “e” y “ Δe ”. Así, se obtienen nueve reglas difusas, cuyas premisas dicen: Si “e” es N y “ Δe ” es N, entonces la salida “z” es...

- Si “e” es N y “ Δe ” es Z, entonces la salida “z” es...
- Si “e” es N y “ Δe ” es P, entonces la salida “z” es...
- Si “e” es Z y “ Δe ” es N, entonces la salida “z” es...
- Si “e” es Z y “ Δe ” es Z, entonces la salida “z” es...
- Si “e” es Z y “ Δe ” es P, entonces la salida “z” es...
- Si “e” es P y “ Δe ” es N, entonces la salida “z” es...
- Si “e” es P y “ Δe ” es Z, entonces la salida “z” es...
- Si “e” es P y “ Δe ” es P, entonces la salida “z” es...



Fuente: Referencia [4]

Figura 7. Sistema de inferencia difusa bajo diseño.

El siguiente desafío consiste en seleccionar las conclusiones adecuadas para cada regla, de tal manera que el SID funcione efectivamente como controlador. Para ello, se acude al análisis de las figuras 6a y 6b, donde se definen ocho regiones de la (i) a la (viii). Nótese que las regiones impares (i, iii, v, vii) son intervalos de la respuesta y que las pares (ii, iv, vi, viii) corresponden a puntos específicos donde el error tiene características particulares. Se establece que la salida del sistema de inferencia difusa “z” corresponderá al cambio de la entrada al sistema que produce la respuesta bajo estudio, con lo cual pasará a ser llamada “ Δu ”. Se definen para “ Δu ” cinco particiones de su universo de discurso: “NG: Negativo Grande”, “NP: Negativo Pequeño”, “Z: Cercano a cero”, “PP: Positivo Pequeño”, “PG: Positivo grande”. Al momento presente, en el cual no se ha definido si la etapa de “defuzzificación” corresponderá al tipo de SID Mamdani, Takagi-Sugeno o Tsukamoto, no es necesario definir aún si cada partición corresponderá a una función de membresía (Mamdani, Tsukamoto) o a coeficientes (Takagi-Sugeno).

Se procede a analizar la respuesta de las figuras 6a y 6b de la siguiente manera:

- Región (i): es donde “e” es P, ya que es superior a cero según la figura 6b, y “ Δe ” es N, ya que el error decrece. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema lo menos posible para que esta continúe su tendencia natural hacia la referencia. Así, se

establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es Z.

- Región (ii): es donde “e” es Z (cercano a la referencia) y “ Δe ” es N, ya que el error sigue decreciendo. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema en sentido descendente para compensar la tendencia a alejarse, pero no en demasía, ya que la respuesta se encuentra cerca de la referencia. Así, se establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es NP.
- Región (iii): es donde “e” es N (pasado por exceso de la referencia) y “ Δe ” es N, ya que el error sigue decreciendo. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema en sentido descendente para compensar la tendencia a alejarse, más aún que en el caso anterior, ya que la respuesta se ha alejado de la referencia. Así, se establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es NG.
- Región (iv): es donde “e” es N (pasado por exceso de la referencia) y “ Δe ” es Z, ya que en ese punto se tiene un máximo de la respuesta y su cambio es cero. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema en sentido descendente para compensar que la respuesta sigue lejana a la referencia, pero no tanto como en el caso anterior, ya que en esta oportunidad no hay tendencia a ale-

jarse. Así, se establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es NP.

- Región (v): es donde “e” es N (pasado por exceso de la referencia) y “ Δe ” es P, ya que ha empezado a crecer. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema lo menos posible para que esta continúe su tendencia natural hacia la referencia. Así, se establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es Z.
- Región (vi): es donde “e” es Z (cerca referencia) y “ Δe ” es P, ya que continúa creciendo. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema en sentido ascendente para compensar la tendencia a alejarse, pero no en demasía, ya que la respuesta se encuentra cerca de la referencia. Así, se establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es PP.
- Región (vii): es donde “e” es P (pasado por defecto de la referencia) y “ Δe ” es P, ya que continúa creciendo. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema en sentido ascendente para compensar la tendencia a alejarse, más aún que en el caso anterior, ya que la respuesta se ha alejado de la referencia. Así, se establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es PG.
- Región (viii): es donde “e” es P (pasado por defecto de la referencia) y “ Δe ” es Z, ya que en ese punto se tiene un mínimo de la respuesta y su cambio es cero. De tal modo, conviene modificar la entrada al sistema en sentido ascendente para compensar la tendencia a alejarse, pero no tanto como en el caso anterior, ya que en esta oportunidad no hay tendencia a alejarse. Así, se establece que, para esta regla difusa, la conclusión es que “ Δu ” es PP.

Luego de la región (viii), se tiene que la regla difusa correspondiente es la misma que en la región (i), con lo cual el análisis en régimen transitorio está culminado. Solo quedaría por asignar conclusión a

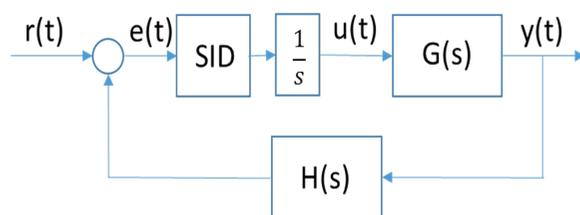
la regla en la cual tanto “e” como “ Δe ” son Z, que ocurre solo en régimen permanente. Evidentemente, para esta regla, la conclusión es que “ Δu ” es Z. Es posible expresar el compendio de reglas difusas en la forma de la llamada Tabla McVicar-Wheelan, como se hace a continuación en la Tabla 1.

TABLA 1. COMPENDIO DE REGLAS DIFUSAS EXPRESADAS EN TABLA MCVICAR-WHEELAN

$\Delta e \backslash e$	N	Z	P
N	NG	NP	Z
Z	NP	Z	PP
P	Z	PP	PG

Fuente: Referencia [5]

El paso siguiente corresponde al de seleccionar el método de “defuzzificación”, y con ello las funciones de membresía para las conclusiones o los coeficientes de salida en caso de que se determine “defuzzificar” según Takagi-Sugeno. Para finalizar, se incorpora el sistema de inferencia difusa seleccionado en un esquema como el mostrado en la figura 8.



Fuente: Referencia [6]

Figura 8. Esquema de control a lazo cerrado con controlador difuso.

El integrador incorporado a la salida del sistema de inferencia difusa, obedece a que la salida “ Δu ” de este debe ser integrada para obtener “ $u(t)$ ”. Con ello, estamos en presencia de un controlador Proporcional-Integral difuso. Su principal característica y diferencia en comparación a un controlador clásico, es que la necesidad de sintonizar ganancias se sustituye

por la versatilidad y adaptabilidad del sistema de inferencia difusa que actuará de manera similar, aun cuando la planta $G(s)$ a controlar pudiera presentar variaciones en cuanto a sus parámetros. Nótese que el análisis hecho para el diseño del sistema de inferencia difusa, no depende de parámetros propios de la planta a controlar [5].

OTRAS APLICACIONES DE LÓGICA DIFUSA EN EL CONTROL ADAPTIVO

En la sección anterior, se realizó el análisis para el diseño de lo que podríamos llamar un controlador difuso básico, que no es más que la construcción de un sistema de inferencia difusa completo (variables de entrada, definición de conjuntos difusos en el universo de discurso de ambas variables, compendio de reglas difusas, selección de procedimiento de “defuzzificación”) que actúe como controlador para el seguimiento de una referencia por parte de una planta de segundo orden. Sin embargo, para el control adaptivo, entendido como el diseño de controladores para condiciones de operación en la cuales sus parámetros deban cambiar en el tiempo, existen otras alternativas que satisfacen necesidades razonables. Se pueden enumerar algunos ejemplos:

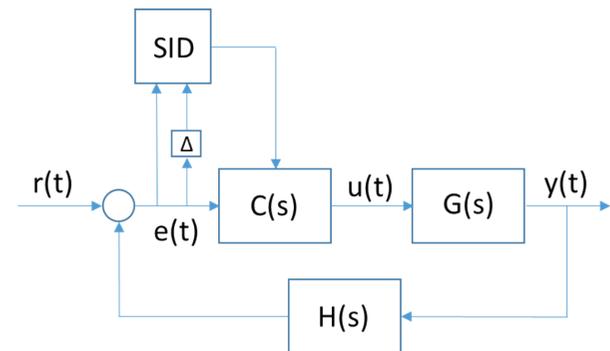
- Controladores P, PI, PD o PID, cuyas ganancias deban cambiar en el tiempo.
- Controladores o compensadores múltiples que deban entrar y salir de operación según condiciones particulares de la planta.

Controladores que deban consultar modelos de referencia de la planta a controlar [6].

Son situaciones que pueden presentarse ante sistemas a controlar que presenten no linealidades o variaciones temporales en sus parámetros. Para ello, se acuden a alternativas adicionales a las presentadas en la sección anterior, o también a las que obedecen a esquemas como los que se muestran a continuación:

Control clásico con parámetros variados por un sistema de inferencia difusa: en ocasiones, puede ser necesario que el controlador $C(s)$ que muestra la figura 9 sea tan flexible como para que sus parámetros cambien debido a condiciones de operación específicas. De tal modo, es posible que un sistema

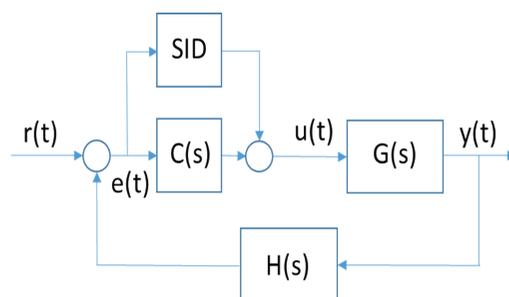
de inferencia difusa varíe, por ejemplo, las ganancias de un controlador PID u otros parámetros de un compensador en adelanto-atraso. En la figura, se propone que lo haga a partir de reglas difusas sobre el error $e(t)$ y su cambio, pero también pudiera considerarse algún estado medible de la planta $G(s)$ o la propia salida $y(t)$.



Fuente: Referencia [6]

Figura 9. Esquema de control adaptivo en el cual un sistema de inferencia difusa modifica parámetros en un controlador clásico.

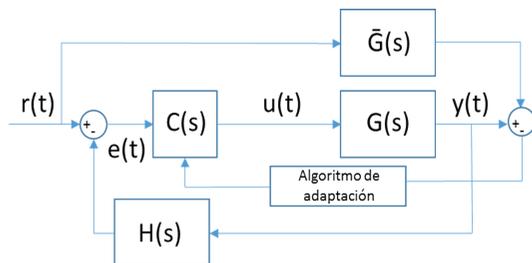
Sistema de inferencia difusa en interacción con un controlador clásico: es posible la interacción de dos controladores si el rendimiento esperado del control de la planta lo demanda. No solo la superposición es posible en este esquema, sino el trabajo alternado entre ellos, que pudiera obedecer a que, en ocasiones, la operación no lineal de la planta requiera un controlador difuso; pero que, en otras, un controlador clásico sea ideal. La figura 10 muestra el esquema propuesto que puede considerar un sumador a la salida de ambos controladores o un conmutador que obedezca a decisiones de control adicionales.



Fuente: Referencia [6]

Figura 10. Esquema de control adaptivo en el cual un sistema de inferencia difusa interactúa con un controlador clásico.

Control adaptivo con modelo de referencia: es una de las opciones donde más desafíos de investigación pueden encontrarse. A diferencia del esquema propuesto en la figura 9, el controlador se modifica obedeciendo al error entre la salida de la planta real $G(s)$ a controlar y la salida que provee un modelo de referencia $\bar{G}(s)$ de la misma planta que se ejecuta en tiempo real, ante la misma entrada. Con ello, se busca que la salida de planta real se parezca lo más posible a la salida de su modelo teórico, el cual evidentemente no presenta las variaciones que puede obtener la planta real. En este caso, el controlador se modifica, de manera tal, que compensa las variaciones de la planta. Para ello, es necesario un algoritmo de adaptación que puede incorporar sistemas de inferencia difusa, entre otros. Sin embargo, en este esquema se debe considerar una arquitectura de control lo suficientemente versátil y rápida para ejecutar en tiempo real el modelo teórico, con lo cual se incrementa su complejidad y, por consiguiente, sus costos y consumo de potencia. Por ello, también ha sido necesario considerar para la implementación de $\bar{G}(s)$, técnicas de modelado difuso con las cuales se pueda reducir el costo computacional del algoritmo de control. Es así como, aunque la figura 11 no muestra en ningún bloque un sistema de inferencia difusa, es procedente considerar este esquema en las presentes reflexiones ya que las técnicas de lógica difusa son pertinentes tanto para el algoritmo de adaptación como para el requerido modelado de la planta a controlar [7] [8].



Fuente: Referencia [6]

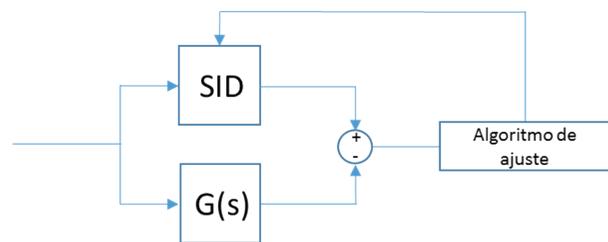
Figura 11. Esquema de control adaptivo con modelo de referencia.

IDENTIFICACIÓN DIFUSA

En la sección anterior, se hace referencia a un esquema de control adaptivo en el que se incorpora

un modelo de referencia de la planta a controlar, que es consultado por el algoritmo de control para adaptar su rendimiento, de tal manera que la planta a controlar se comporte como su modelo teórico. No obstante, la demanda de mayor complejidad en la arquitectura de control en la cual residen los algoritmos y el incremento del costo computacional, ha motivado también a incorporar técnicas de lógica difusa no solo para el control, sino también para el modelado o identificación de sistemas.

La identificación difusa es un proceso iterativo mediante el cual se adapta o entrena un sistema de inferencia difusa, con la finalidad de que este tenga el mismo comportamiento dinámico que cierto modelo. Con ello, se logra que este identifique ese modelo y pueda ser considerado como representación matemática de tal planta. Para ello, considérese el diagrama de bloques de la Figura 12. El propósito es que el modelo concreto sirva de “profesor” al sistema de inferencia difusa para que este se automodifique hasta que la diferencia entre las salidas sea mínima, es decir, a que “aprenda” a comportarse como su “profesor”, en un proceso que denominaremos de “entrenamiento” o “aprendizaje”.



Fuente: Referencia [6]

Figura 12. Proceso de identificación difusa. El propósito es entrenar al sistema de inferencia difusa para que actúe como la planta $G(s)$.

Con este esquema, es necesario realizar ejecuciones sucesivas estratégicas del modelo $G(s)$ de la planta a identificar, ya que para que el sistema de inferencia difusa se comporte como él, se debe considerar en el proceso de entrenamiento el sometimiento del “profesor” a una serie de entradas lo suficientemente generales para extraer de él una respuesta que represente todos sus posibles comportamientos dinámicos. El algoritmo de ajuste determinará modificaciones en los parámetros del sistema de infe-

rencia difusa (parámetros de las funciones de membresía o coeficientes de salida en el caso de que se considere el tipo Takagi-Sugeno), de tal manera que la diferencia entre las salidas sea mínima y que los valores de los parámetros del sistema de inferencia difuso converjan. Las entradas al modelo concreto y al sistema de inferencia difusa, deben ser las mismas, de manera tal que las respuestas a estas sean coherentes.

Como se explica en las primeras secciones, los sistemas de inferencia difusa se componen de operaciones de entrada-salida lineales que son capaces de mapear comportamientos no lineales si la cantidad de operaciones consideradas (reglas difusas) son suficientes [9]. Por lo tanto, es posible sustituir las no linealidades de un modelo de referencia por sistemas de inferencia difusa y, así, con un modelo de referencia difuso, se reduce la desventaja advertida en un inicio sobre el mayor costo computacional que contemplaba el esquema de la figura 11. Esto ha permitido modelar sistemas no lineales a partir de sistemas de inferencia difusa con precisión suficiente para propósitos de control [10] [11].

VENTAJAS DE INCORPORAR TÉCNICAS DE MODELADO DIFUSO EN INGENIERÍA DE CONTROL

Los sistemas de inferencia difusos han hecho que el control adaptivo sea cada vez más accesible y factible de implementar. La necesidad de este radica en que, en la práctica, muy pocos sistemas cumplen con las características de ser lineales e invariantes en el tiempo. La no linealidad es muy común en sistemas que presentan fenómenos de histéresis (sistemas magnéticos), relaciones cuadráticas, conmutaciones (motores eléctricos industriales), etc. También, es común que encontremos sistemas cuyos parámetros cambian con la temperatura, con el desgaste temporal típico de operaciones en ambientes hostiles (corrosión, exposición a agentes químicos) o por su propia naturaleza (inductancias en motores eléctricos que cambian con la corriente que fluye a través de ellas), que hacen complicado modelarlos considerando que sus parámetros no van a cambiar. Hasta casos en los que el comportamiento de ciertos

parámetros es aleatorio, han motivado a buscar alternativas a los controles clásicos, como las técnicas de “Soft computing” de lógica difusa y redes neuronales. Sin embargo, las técnicas de lógica difusa gozan de la ventaja de poder ser implementadas bajo premisas imprecisas, por lo que en ocasiones se hace posible diseñar controladores eficaces sin el conocimiento exhaustivo de la planta objeto de control.

CONCLUSIONES

El presente artículo de reflexión destaca las fortalezas de la lógica difusa como alternativa a incorporar en esquemas de control, en los cuales las opciones clásicas no ofrezcan un rendimiento que satisfaga las demandas requeridas. Ya sea por características propias de la planta (no linealidad, variabilidad de parámetros), o desconocimiento parcial de su dinámica. Se determina la procedencia de sistemas de inferencia difusa, como controladores y como complementos a esquemas de control adaptivo. El uso de modelos de referencia en esquemas de control, es también susceptible de ser mejorado considerando que tales modelos pueden ser implementados con sistemas de inferencia difusa, con lo cual se garantiza linealidad en las operaciones asociadas a la ejecución del modelo y, así, reduciendo costos computacionales, complejidad en las arquitecturas en las cuales residen los esquemas de control y hasta consumo energético.

REFERENCIAS

- [1] L. A. Zadeh, “Pruf and its application to inference from fuzzy propositions”, in Decision and Control including the 16th Symposium on Adaptive Processes and A Special Symposium on Fuzzy Set Theory and Applications, 1977 IEEE Conference on, Dec 1977, pp. 1359-1360.
- [2] A. Matute, “Desarrollo de un generador de modelos difusos para la máquina de reluctancia conmutada”, Master’s thesis, Universidad Simón Bolívar, 2014.

- [3] Mathworks. Matlab, ““what is fuzzy logic?””, Help, 2014.
- [4] E. M. Jyh-Shing Roger Jang, Chuen-Tsai Sun, Neuro Fuzzy and Soft Computing. Prentice Hall, 1997.
- [5] S. S. L. Chang and L. A. Zadeh, “On fuzzy mapping and control”, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, vol. SMC-2, no. 1, pp. 30-34, Jan 1972.
- [6] J. Viola, “Control adaptativo de sistemas electrónicos de potencia con redes neuronales y criterio de estabilidad de lyapunov”, Ph.D. dissertation, Universidad Simón Bolívar, 2007.
- [7] S. Tahmasebi, M. A. Khanesar, and M. Teshnehlab, “Adaptive direct fuzzy control of siso nonlinear systems using a fuzzy reference model”, in 2016 3rd International Conference on Advances in Computational Tools for Engineering Applications (ACTEA), July 2016, pp. 93-98.
- [8] G. Shahgholian, M. Maghsoodi, M. Mahdavian, M. Janghorbani, M. Azadeh, and S. Farazpey, “Analysis of speed control in dc motor drive by using fuzzy control based on model reference adaptive control”, in 2016 13th International Conference on Electrical Engineering/Electronics, Computer, Telecommunications and Information Technology (ECTI-CON), June 2016, pp. 1-6.
- [9] B. Kosko, “Fuzzy systems as universal approximators,” IEEE Transactions on Computers, vol. 43, no. 11, pp. 1329-1333, Nov 1994.
- [10] A. Matute, J. Viola, J. Restrepo, J. M. Aller, and F. Quizhpi, “Switched reluctance machine fuzzy modeling applied on a mrac scheme”, in Circuits Systems (LASCAS), 2015 IEEE 6th Latin American Symposium on, Feb 2015, pp. 1-4.
- [11] A. Matute and M. Srefezza, “Sepic type dc-dc converter fuzzy model”, in ICCAS-SICE, 2009, Aug 2009, pp. 891-895.