

# Automatic Generation Control (AGC) based on Fuzzy Logic in a two area power system

Daniel R. Marín-Zavaleta  
*Escuela Superior de Ingeniería Mecánica y Eléctrica*  
*Sección de Estudios de Posgrado e Investigación*  
Ciudad de México, México  
dmarin@ieee.org

**Abstract**—This paper describes the desing and evaluation of a Fuzzy Automatic Generation Control (AGC) in a two area power system, including a single reheat steam turbine in Area 1 and a hydraulic turbine in Area 2. The used approach, based on fuzzy logic, adaptively select the best control action to set the speed changer based on the power system operator's experience whenever a disturbance is applied. The results obtained by this approach outperform the ones obtained by conventional PI controllers.

**Index Terms**—Automatic Generation Control, Area Control Error, Fuzzy logic, Speed regulation.

## I. INTRODUCCIÓN

En general, un sistema eléctrico de potencia consiste en varios elementos interconectados que forman un gran y complejo sistema capaz de generar, transmitir y distribuir energía eléctrica sobre un área geográfica e específica. Su principal función [1] es suministrar energía a los usuarios con una determinada calidad en el servicio, por lo que debe ser diseñado para cumplir con los siguientes requerimientos:

- 1) Debe ser capaz de proveer la energía que demanden los usuarios.
- 2) La energía entregada debe cumplir requerimientos mínimos de calidad, tales como:
  - Regulación de voltaje.
  - Constancia en la frecuencia.
  - Continuidad en el suministro.
- 3) Además, la energía debe ser producida a bajo costo.

Para lograr el cumplimiento de los primeros dos puntos, cualquier sistema de potencia utiliza dos lazos de control primarios con el fin de regular las principales características (frecuencia y magnitud) de la señal senoidal entregada [1]. El lazo de control que mantiene el voltaje en terminales a niveles aceptables en las máquinas síncronas se llama *Regulador Automático de Voltaje* (AVR, por sus siglas en inglés) y es de naturaleza eléctrica, mientras que, el lazo de control encargado de regular la frecuencia es de naturaleza mecánica y es llamado *Regulador (o Gobernador) de Velocidad* por a la dependencia intrínseca entre la frecuencia de la onda senoidal y la velocidad de giro del rotor.

Sin embargo, la generación de energía eléctrica esta sujeta a cambios graduales para poder ajustarse a las variaciones de la demanda, lo que ocasiona que se registren cambios en la frecuencia del sistema, por lo que el problema de

control de velocidad es de gran importancia para la calidad en el suministro [1], [2]. Entonces, para cualquier sistema de potencia el control manual de la frecuencia no es viable. Dentro de los tipos de controladores existentes, el más popular es el PI y es ampliamente aplicado en los sistemas de potencia debido a que puede eliminar errores en estado estacionario. Sin embargo, la rápida evolución de los SEP puede dirigir a situaciones tales que el desempeño dinámico del controlador no sea el adecuado, es decir, puede que ciertos factores como el tiempo de subida o de asentamiento no sean los requeridos, esto ocasiona que el controlador convencional deba ser resintonizado [3].

No obstante, son los operadores de red los encargados de monitorear y estudiar el comportamiento dinámico del sistema, los cuales, durante gran parte de su trabajo, acumulan conocimiento o experiencia que no puede ser representado mediante ecuaciones diferenciales ni ser interpretado como un modelo de control convencional, ya que por lo general, el conocimiento del operador está basado en reglas *si-entonces*.

Bajo este contexto el control difuso ofrece un método para representar e implementar dicho conocimiento. Cabe destacar que en muchos artículos se han resaltado los beneficios y desventajas del uso de este tipo de controladores [4], sin embargo, aún no está claro en qué casos es conveniente su aplicación. Una de las ventajas más notables es el grado de automatización y robustez que permite respecto a los controladores convencionales [5].

En este artículo se estudia el uso del controlador PI difuso para el control de automático de generación.

## II. PRINCIPIOS DE LÓGICA DIFUSA

En la lógica convencional, la representación de reglas y clases de los objetos están claramente definidas ya que los grados de verdad de estos son cierto o falso, sin embargo, el conocimiento humano no es completamente nítido.

Basandose en el principio de que las matemáticas pueden ser utilizadas para encadenar el lenguaje con la inteligencia humana, se desarrolló una extensión de la idea de un conjunto clásico booleano que se denominó *conjunto difuso*, para poder tomar en cuenta las múltiples variaciones entre verdadero y falso [6]. Esta es la principal diferencia entre la lógica booleana y la lógica difusa, ya que esta considera diferentes *grados de verdad*. En lugar de que un elemento sea 100%

perteneciente a una clase puede establecerse que pertenece parcialmente a múltiples clasificaciones.

#### A. Conjuntos difusos y funciones de membresía [4]

La función que indica dichos grados de verdad se denomina *función de membresía*, como definición:

$$\mu_F : U \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

Donde  $U = \{u_1, u_2, \dots, u_n\}$  es un conjunto finito de elementos que pueden ser clasificados como  $F$  (es decir,  $F$  es un calificador lingüístico). Por lo tanto, el conjunto de tuplas (o pares ordenados) dados por  $(u, \mu_F(u))$ , define completamente a otro conjunto, denominado *conjunto difuso*, esto es:

$$F = \{(u, \mu_F(u)) \mid u \in U\} \quad (2)$$

#### B. Tipos de funciones de membresía

Los grados de pertenencia de un elemento a un conjunto difuso pueden ser representados por diferentes funciones, pero las más típicas son: triangular, trapezoidal y de campana.

1) *Triangular*: Se define mediante un límite inferior, un valor central y un límite superior, pudiendo ser o no simétrica. La función que la representa es la siguiente:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b} & \text{si } b < x \leq c \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (3)$$

2) *Trapezoidal*: Se define por un límite inferior, un límite superior y dos límites de soporte tal que  $a < b < c < d$ . Si los valores de  $b$  y  $c$  son iguales se obtiene una función triangular. Está dada por:

$$\mu_i(x) = \begin{cases} \frac{x-a}{b-a} & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1 & \text{si } b < x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c} & \text{si } c < x \leq d \\ 0 & \text{de otro modo} \end{cases} \quad (4)$$

3) *Gaussiana*: Se define por el valor medio de la campana y la varianza, su función está dada por:

$$\mu_i(x) = \exp \left[ - \left( \frac{x-m}{\sigma} \right)^2 \right] \quad (5)$$

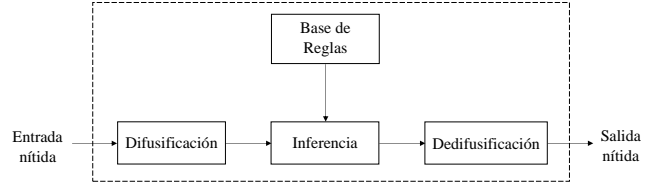


Fig. 1. Controlador lógico-difuso con sus etapas de funcionamiento.

#### C. Variables lingüísticas y toma de decisiones

Ahora bien, el conocimiento humano se basa en la capacidad de hacer inferencias a partir de clasificaciones para ciertos objetos. Por ejemplo, la edad es una variable lingüística cuando su dominio toma “valores” como joven, adulto o senil, en lugar de valores reales. Este proceso de descripción de variables es uno de los puntos más importantes para el desarrollo de controladores basados en lógica difusa, pues permitirá establecer inferencias tales como: *si* el error medido en una señal es positivo, *entonces*, se debe incrementar la señal de control.

### III. CONTROLADORES LÓGICO-DIFUSOS [5]

En un control clásico, bajo la arquitectura de retroalimentación, el error es introducido al controlador para producir una acción que modifique el comportamiento de la planta, en este proceso, ambas señales de entrada y salida son nítidas. No obstante, es posible reutilizar esta misma configuración en el controlador basado en lógica difusa, con la única diferencia que el controlador deja de ser una función de transferencia continua ya que considera diferentes posibles estados de la planta de acuerdo con la pertenencia de las entradas a un calificador lingüístico. En la Fig. 1 se muestra la estructura básica de un controlador lógico-difuso.

La estructura interna de este controlador se comprende de tres bloques, los cuales se describen a continuación con base en [4], [5], [7]:

1) *Difusificación*: Esta es la primera etapa que se presenta en el sistema de control, realiza una transformación de la entrada nítida a un valor lingüístico para ser compatible con la representación difusa de las variables de estado para la inferencia de las acciones de control. Es decir, asigna valores lingüísticos a la entrada nítida, por ejemplo, si la entrada  $u$  es 0.97 en un dominio comprendido entre 0 y 1, puede decirse que la entrada es algo “grande”.

2) *Inferencia a partir de reglas*: La función básica del proceso de inferencia es determinar la acción lingüística que debe realizar el controlador ante los valores nítidos de las variables de estado sensadas. Una vez difusificados, es posible establecer las consecuencias que deben ejecutarse para cierto valor de la entrada, en otras palabras, se implementa el conocimiento humano en forma de reglas para establecer acciones de control, que en este sentido, serán difusas.

Existen dos tipos principales de inferencia: tipo Mamdani y Sugeno. De los cuales el más empleado es el primero, sus principales diferencias son que en el controlador tipo Mamdani

la acción de control difusa son funciones de membresía, mientras que el tipo Sugeno consiste en inferir con base a calificadores lingüísticos una acción de control representada por una función que toma como entrada los valores nítidos de las variables de estado.

3) *Dedifusificación*: Este proceso consiste en convertir la acción de control difusa a un valor nítido, es decir, el calificador lingüístico deberá traducirse a su dominio físico. Por ejemplo, si la acción difusa resulto ser algo “grande” se debe conocerse en la medida de lo grande el valor numérico de esta acción para saber qué valor nítido será ingresado a la planta. Esto es requerido para los tipos de inferencia de Mamdani y Sugeno. Para realizarlo existen diferentes métodos dentro de los que destacan:

- Centro de gravedad.
- Centro de área.
- Centroide.

En este trabajo se utiliza el centroide para dedifusificar la acción de control. Para mayor información sobre estos procedimientos consulte [8].

#### IV. ANALOGÍA DE CONTROLADORES CLÁSICOS Y LÓGICO-DIFUSOS

Basandose en la arquitectura de retroalimentación convencional para los sistemas de control, es posible identificar que una variable de estado importante es el error, dado por:

$$e = ref - \hat{y} \quad (6)$$

Donde  $ref$  es el valor de referencia y  $\hat{y}$  es el valor medido a la salida de la planta.

##### A. Controlador Proporcional

En general este proceso consiste en comandar una señal de control proporcional a la diferencia entre la referencia y el valor medido de la señal controlada, esto es:

$$u = K_p e \quad (7)$$

En la cual se pueden presentar tres posibles escenarios:

- Si  $\hat{y}$  es mayor que la referencia, entonces  $e$  es negativo.
- Si  $\hat{y}$  es igual que la referencia, entonces  $e$  es cero.
- Si  $\hat{y}$  es menor que la referencia, entonces  $e$  es positivo.

Por lo tanto, al estar en cascada con la planta, la acción de control que deberá aplicarse a cada caso es:

- Si el error es negativo (N), entonces la acción de control también lo será, ya que se busca disminuir la magnitud de  $\hat{y}$ .
- Si el error es cero (CE), entonces la acción de control deberá ser nula. No hay razón para hacer algún cambio en la salida de la planta.
- Si el error es positivo (P), entonces la acción de control también lo será, esto con el fin de incrementar el valor de  $\hat{y}$ .

En resumen, observe la tabla I, se muestran las reglas para determinar las acciones de control sobre la planta. Sin embargo, considere que estás no son únicas, pueden existir  $n$

TABLA I. Reglas para 3 funciones de membresía

$e$	N	CE	P
Acción de control	N	CE	P

reglas y aún así ser válidas, por ejemplo, el error puede tener clasificaciones de acuerdo a su magnitud, i. e., positivo grande, positivo pequeño, cero, negativo pequeño y negativo grande, las cuales tendrán sus correspondientes acciones difusas. Depende de la descripción usada por el operador.

##### B. Controlador Proporcional-Derivativo

Matemáticamente, expresado por:

$$u = K_p e + K_d \frac{de}{dt} \quad (8)$$

Pueden establecerse relaciones similares a las expuestas anteriormente. Sin embargo, conviene analizar lo que sucede con la parte derivativa del controlador. De la ecuación (8), si se consideran intervalos suficientemente pequeños durante el muestreo de las señales, la derivada puede aproximarse por:

$$\frac{de}{dt} \approx \Delta e \quad (9)$$

Donde  $\Delta e$  representa el cambio del error, el cual es totalmente accesible por el muestreo de la señal de salida.

Esta nueva variable refleja directamente la dinámica que ha tendido la variable controlada. Para un instante de tiempo  $t_k$ , sea:

$$\Delta e_k = e_k - e_{k-1} \quad (10)$$

- Si  $\Delta e_k$  es positivo, entonces  $\hat{y}$  tiende a aproximarse o alejarse de la referencia (por debajo, o por sobre ella, respectivamente) con una pendiente positiva.
- Si  $\Delta e_k$  es cero, entonces  $\hat{y}$  no ha sufrido ningún cambio, es decir, se mantuvo constante, lo cual no implica que  $\hat{y}$  esté en la referencia.
- Si  $\Delta e_k$  es negativo, entonces  $\hat{y}$  se aleja o se acerca a la referencia (por debajo, o por sobre ella, respectivamente) con una pendiente negativa.

Por lo que reglas adicionales a la parte proporcional pueden ser construidas, que en conjunto con las listadas arriba permiten hacer inferencias, tales como:

- Si  $\Delta e$  es positivo y el error es positivo (quiere decir que  $\hat{y}$  se acerca hacia la referencia por debajo), entonces la acción de control deberá ser positiva, de tal forma que contribuya a la misma tendencia de  $\hat{y}$  por alcanzar la referencia.

Reglas similares a esta pueden resumirse en una tabla, llamada *base de reglas* (Véase el proceso mostrado en la Fig. 1). La tabla II muestra inferencias para acciones de control basadas en el comportamiento de las variables  $e$  y  $\Delta e$ .

##### C. Controlador Proporcional-Integral

Siguiendo el mismo enfoque, este controlador al tener una expresión dada por:

$$u = K_p e + K_i \int edt \quad (11)$$

TABLE II. Base de reglas para tres funciones de membresía

$\Delta e \backslash e$	N	CE	P
N	N	N	CE
CE	N	CE	P
P	CE	P	P

Sería posible establecer reglas para la parte proporcional e integral (aproximandola como una sumatoria), sin embargo, estas últimas serían bastante complejas por el simple hecho de que la integral del error no tiene un significado físico como el del cambio expresado por la derivada.

Por lo anterior, si la ecuación (11) es derivada respecto al tiempo se tiene que:

$$\frac{du}{dt} = K_p \frac{de}{dt} + K_i e \quad (12)$$

La cual, para un tiempo  $t_k$ , es equivalente a:

$$\Delta u_k = K_p \Delta e + K_i e \quad (13)$$

Con lo que se pueden establecer reglas similares a las de la tabla II, las cuales no serían aplicables directamente a la acción de control, si no al cambio en la misma y ya que  $du/dt \approx \Delta u$ , se establece que:

$$\Delta u_k = u_k - u_{k-1} \quad (14)$$

Por lo tanto, la señal de control actual estaría dada por:

$$u_k = u_{k-1} + \Delta u_k \quad (15)$$

Mostrándose que las características conocidas de los controladores  $P$ ,  $PD$  y  $PI$ , pueden ser obtenidas mediante reglas similares. Principalmente, se destaca que los controladores  $P$  y  $PD$  difusos no logran eliminar el error en estado estacionario al igual que sus contrapartes continuas. Sin embargo, ya que el  $PI$  difuso muestra explícitamente un incremento a la acción de control previa, es de esperarse que después de cierto tiempo, el error en estado estacionario se elimine, haciéndolo un buen candidato para el control de velocidad de las máquinas síncronas.

## V. CASO DE ESTUDIO

Por su propia naturaleza, los sistemas de potencia son sistemas de gran complejidad, descritos por ecuaciones algebraicas y diferenciales no lineales, las cuales muestran que las oscilaciones son una parte constitutiva de la dinámica del sistema. Sin embargo, uno de los grandes problemas dinámicos en los SEP es la producción de oscilaciones, que por ser un problema sistémico afectan a todas las variables del sistema.

Entre los años 20 y 30, con el incremento de la demanda y la expansión demográfica, se vio la necesidad de interconectar los sistemas eléctricos aislados para promover el intercambio de energía y permitir el abastecimiento de la carga [9] formándose áreas de control.

Por ello, en este artículo se revisa el comportamiento de un sistema de dos áreas incluyendo no linealidades físicas y necesarias, con la premisa de que los efectos observados podrán ser

extrapolados a un sistema multiáreas. La estrategia de control utilizada se basa en lógica difusa y permite considerar un *Error de Área de Control (ACE)* de cierta forma diferente al utilizado normalmente, pues adquirirá valores difusos y contempla el cambio del error.

### A. Sistema de Prueba

Con base en los modelos descritos en [2] y [1] se plantean escenarios con un tiempo de simulación de 300 segundos. El área uno se compone de una planta térmica sin recalentamiento y el área dos por una planta hidráulica.

Se diseña la línea de transmisión (que funciona como enlace) sin pérdidas asumiendo que se transmite 0.1 p.u. de potencia máxima y que la diferencia angular  $\delta$  entre los buses de interconexión es de  $30^\circ$ .

Las áreas son sometidas a cambios de carga descritos por un escalón de 0.10 y 0.05 en por unidad, respectivamente, los cuales no ocurren en el mismo instante. El primer disturbio ocurre a los 5 segundos de simulación y el siguiente a 150 segundos.

El método numérico utilizado para resolver las ecuaciones diferenciales del sistema es Runge-Kutta de 4to orden con un paso de integración de 0.001 segundos.

En la Fig. 2 se observa el sistema propuesto, mientras que en la Fig. 3 se aprecia un diagrama a bloques del sistema de control automático de generación. Sin embargo, se omite el modelado a detalle de la fuente de energía y se asumen características similares en la carga de cada área.

### B. Controlador PI difuso

Para el controlador  $PI$  difuso, se optó por utilizar funciones de membresía triangulares y trapezoidales. Se utilizan tres funciones de membresía para el error y el cambio del error (ambos expresados en por ciento) y se emplea una matriz asociativa difusa similar a la de la Tabla II, en la cual, el

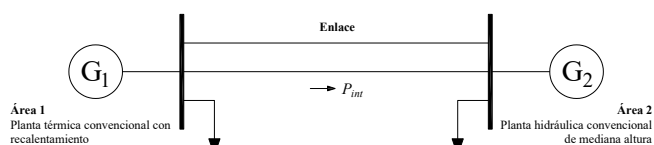


Fig. 2. Sistema de prueba de 2 áreas.

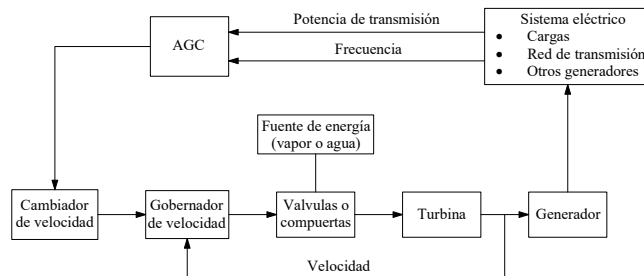


Fig. 3. Esquema de control y generación de energía eléctrica en un sistema de potencia compuesto por máquinas síncronas [2].

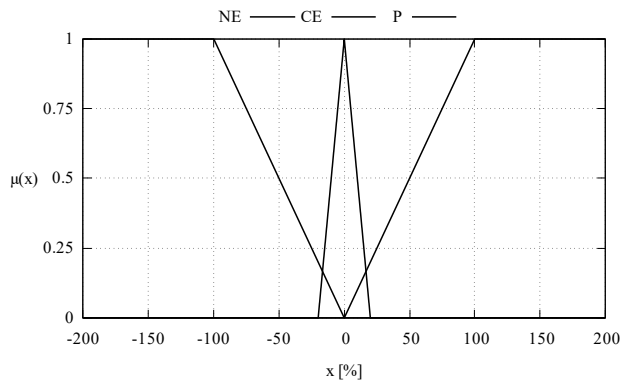


Fig. 4. Funciones de memebresía utilizadas para el error, cambio del error y acción de control.

dominio de la salida también consta de tres funciones de memebresía y es expresado en por ciento. Las gráficas que representan estas funciones se muestran en la Fig. 4.

El dominio de cada una de las variables es considerado de menos infinito a más infinito, exceptuando la acción de control, la cual se considera de  $-100$  a  $100$  %, donde:

- $-100\%$  indica que la válvula o compuerta debe comandarse a un cierre total
- $0$  representa una acción de control nula, es decir, el equilibrio, y
- $+100\%$  indica que la válvula o compuerta debe comandarse a una apertura total.

Por lo que es necesario establecer que en una aplicación real deben considerarse rampas o reglas adicionales tales que limiten la velocidad de respuesta del controlador, es decir, que limiten el comando de inyección de vapor o caída de agua, pues como se involucran grandes masas en este proceso, cambios abruptos ocasionarían daños mecánicos al sistema de generación, tal como se muestra en [10]. Sin embargo, en este artículo se omiten esas consideraciones ya que los cambios a los que se somete el sistema son pequeños.

En la Fig. 5 se observa la respuesta del sistema de dos áreas sin controles clásicos ni difusos. Puede apreciarse que la frecuencia cae hasta  $0.2$  Hz en el estado permanente después de ocurrir el segundo disturbio.

Este tipo de comportamientos son inaceptables desde el punto de vista operacional, por lo que es necesario alcanzar una mayor regulación en la frecuencia y para lograrlo se requiere de la manipulación del cambiador de velocidad de acuerdo a alguna estrategia de control. El controlador PI difuso ofrece una alternativa a los métodos convencionales.

### C. Simulaciones

En las figuras siguientes se aprecian los comportamientos de la frecuencia, cambios en la potencia de las turbinas y cambios en la potencia de interconexión.

Nótese que es evidente la mejoría de la respuesta del sistema con la inclusión de los controladores. Sin embargo, a pesar de la simplicidad de diseño del controlador difuso, se observa un

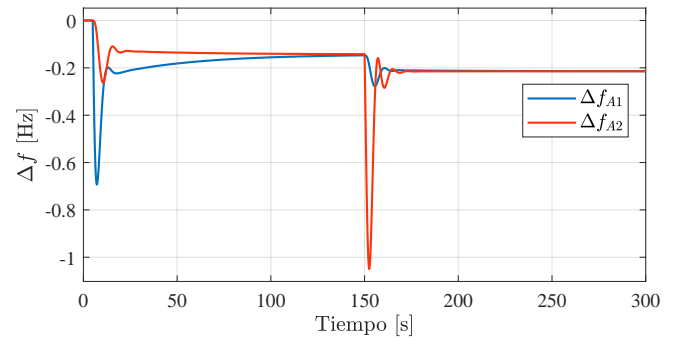


Fig. 5. Respuesta libre del sistema dos áreas ante disturbios de  $0.10$  y  $0.05$  p.u.

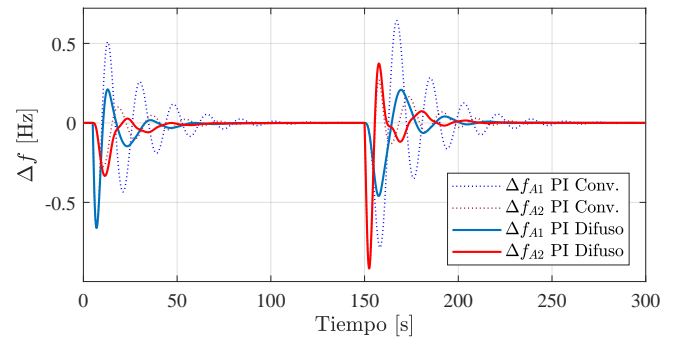


Fig. 6. Cambios en la frecuencia en ambas áreas después de estar sujetas a un disturbio.

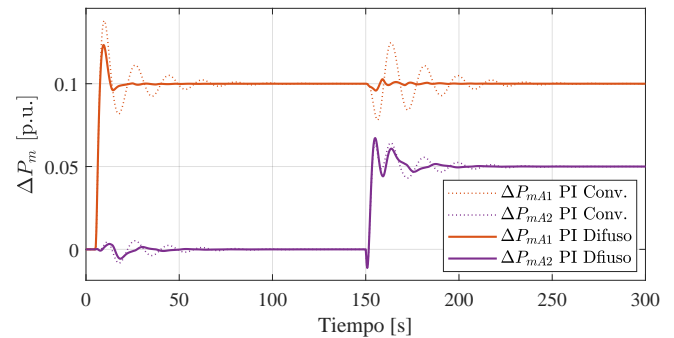


Fig. 7. Variaciones de potencia de generación en las áreas de control.

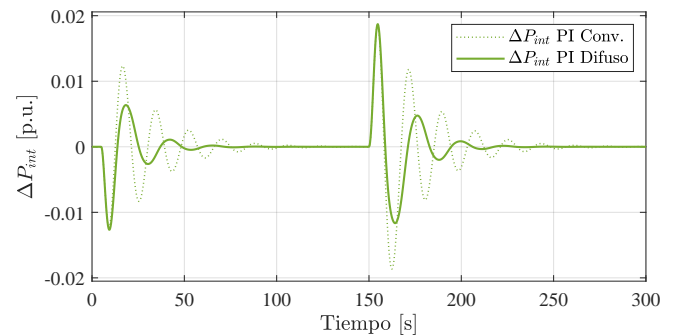


Fig. 8. Perturbaciones en el enlace que interconecta las áreas.

TABLA III. Características de respuesta del sistema ante el primer disturbio

Parámetro $y$	Controlador	$\hat{y}$	$t_s$ [s]
$\Delta f_{A1}$ [Hz]	Convencional	0.6639	89.5809
	Difuso	0.6611	48.2874
$\Delta f_{A2}$ [Hz]	Convencional	0.2744	78.7223
	Difuso	0.3336	58.4256
$\Delta P_{mA1}$ [p.u.]	Convencional	0.1380	58.6562
	Difuso	0.1234	11.7399
$\Delta P_{mA2}$ [p.u.]	Convencional	0.0083	102.3049
	Difuso	0.0056	63.2724
$\Delta P_{int}$ [p.u.]	Convencional	0.0123	102.1354
	Difuso	0.0127	52.5164

TABLA IV. Características de respuesta del sistema ante el segundo disturbio

Parametro $y$	Controlador	$\hat{y}$	$t_s$ [s]
$\Delta f_{A1}$ [Hz]	Convencional	0.7848	91.6785
	Difuso	0.4597	55.4009
$\Delta f_{A2}$ [Hz]	Convencional	0.9198	62.1107
	Difuso	0.9162	35.7328
$\Delta P_{mA1}$ [p.u.]	Convencional	0.1248	95.9923
	Difuso	0.1027	57.1850
$\Delta P_{mA2}$ [p.u.]	Convencional	0.0643	59.9726
	Difuso	0.0672	39.1827
$\Delta P_{int}$ [p.u.]	Convencional	0.0186	95.0459
	Difuso	0.0187	53.9424

mejor desempeño en el sistema al incluir este tipo de control respecto al controlador convencional. En las tablas III y IV se muestra una comparativa del valor pico alcanzado y el tiempo de asentamiento para diferentes variables de interés.

## VI. CONCLUSIONES

De los resultados de simulación, se aprecia que la inclusión de los controladores PI difusos mejora en por lo menos 20 segundos el tiempo de asentamiento del sistema en diversas señales (para los disturbios propuestos).

La técnica desarrollada con base en reglas si-entonces es bastante intuitiva y reduce el esfuerzo de sintonización de los controladores significativamente, pues encapsula la intuición del operador en la matriz asociativa difusa.

Por lo anterior, el amortiguamiento de las oscilaciones se mejora significativamente, haciendo de esta técnica de control una excelente alternativa a implementar en casos en los que el diseño de controladores convencionales no logren cumplir con los requerimientos solicitados.

## REFERENCES

- [1] Olle I. Elgerd, *Electric Energy Systems Theory: An Introduction*. McGraw-Hill, 1971.
- [2] P. Kundur, *Power system stability and control*, vol. 7. McGraw-hill New York, 1994.
- [3] S. Sivanagaraju, *Power system operation and control*. Pearson Education India, 2009.
- [4] D. Driankov, H. Hellendoorn, and M. Reinfrank, *An introduction to fuzzy control*. Springer Science & Business Media, 2013.
- [5] K. M. Passino, S. Yurkovich, and M. Reinfrank, *Fuzzy control*, vol. 42. Citeseer, 1998.
- [6] L. A. Zadeh, G. J. Klir, and B. Yuan, *Fuzzy sets, fuzzy logic, and fuzzy systems: selected papers*, vol. 6. World Scientific, 1996.

- [7] K. Michels, F. Klawonn, R. Kruse, and A. Nürnberger, *Fuzzy control: fundamentals, stability and design of fuzzy controllers*, vol. 200. Springer, 2007.
- [8] W. V. Leekwijck and E. E. Kerre, "Defuzzification: criteria and classification," *Fuzzy sets and systems*, vol. 108, no. 2, pp. 159–178, 1999.
- [9] J. B. Williams, *The Electric Century: How the Taming of Lightning Shaped the Modern World*. Springer Praxis Books, Springer International Publishing, 2017.
- [10] G. A. Chown and R. C. Hartman, "Design and experience with a fuzzy logic controller for automatic generation control (AGC)," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 13, no. 3, pp. 965–970, 1998.