

# Design and Implementation of a Fuzzy Controller for Frequency Control of a Motor in an S7-1200 PLC

Eli Samael Portillo, Ingeniero en Mecatrónica, Jose Luis Ordoñez Avila, Master en administración de proyectos<sup>2</sup>  
Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, jlordonez@unitec.edu<sup>2</sup>

*Abstract– The programmable logic controller (PLC) is the most used control equipment in the industry, this due to its versatility of configuration and programming, not to mention the high resistance of this equipment to industrial environments. In the industry, various processes can be presented, some more complex than others, that require a control system, therefore, in this article, a diffuse controller was designed and implemented for the frequency control of a three-phase motor in a Siemens S7-1200 PLC. Through an incremental methodology, the fuzzy controller was implemented, where initially, it was designed in Matlab and later a function block was developed based on SCL code, the fuzzy controller for frequency control of a motor in the Siemens S7- PLC. 1200. In this way, contributing to the development of intelligent algorithms applicable in today's industry, capable of having precise control based on various input and output variables, including the processing of information with a certain degree of uncertainty. In addition, the cost reduction for obtaining a Toolbox package to configure a fuzzy Siemens controller.*

*Keywords: fuzzy control, membership functions, control system, automation, PLC*

Digital Object Identifier (DOI):  
<http://dx.doi.org/10.18687/LACCEI2020.1.1.490>  
ISBN: 978-958-52071-4-1 ISSN: 2414-6390

**18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education, and Technology:** “Engineering, Integration, and Alliances for a Sustainable Development” “Hemispheric Cooperation for Competitiveness and Prosperity on a Knowledge-Based Economy”, July 27-31, 2020, Virtual Edition.

# Diseño e Implementación de un Controlador Difuso para Control de Frecuencia de un Motor en un PLC S7-1200

Eli Samael Portillo, Ingeniero en Mecatrónica, Jose Luis Ordoñez Avila, Master en administración de proyectos<sup>2</sup>  
Universidad Tecnológica Centroamericana UNITEC, Honduras, jlordonez@unitec.edu<sup>2</sup>

**Abstract**— El controlador lógico programable (PLC) es el equipo de control más utilizado en la industria. Debido a su versatilidad de configuración y programación, sin mencionar la alta resistencia de este equipo a entornos industriales. En la industria, se pueden presentar diversos procesos, unos más complejos que otros, que requieren de un sistema de control. En el presente artículo se diseñó e implementó un controlador difuso para el control de frecuencia de un motor trifásico en un PLC Siemens S7-1200. A través de una metodología incremental, se implementó el controlador difuso, donde inicialmente, fue diseñado en Matlab y posteriormente se desarrolló un bloque de función en base a código SCL el controlador difuso para el control de frecuencia de un motor en el PLC Siemens S7-1200. Aportando, de tal manera, al desarrollo de algoritmos inteligentes aplicables en la industria actual, capaces de tener un control preciso basado en varias variables de entrada y salida, incluyendo el procesamiento de información con cierto grado de incertidumbre. Además, de la reducción de costo para la obtención de algún paquete de Toolbox para configurar un controlador difuso de Siemens.

**Keywords**— control difuso, funciones de pertenencia, sistema de control, automatización, PLC

## I. INTRODUCCIÓN

Actualmente en la industria, existen procesos que requieren de un control con mayor precisión debido al aumento de complejidad del mismo, y estos procesos no pueden ser controlados por algoritmos convencionales. Para estos procesos es necesario el uso de algoritmos o herramientas más avanzados para lograr obtener los resultados apropiados, precisos y requeridos en el proceso que se busca controlar.

Cuando entra en juego la variedad de técnicas existentes de ingeniería de control y automatización para lograr realizar un sistema de control. En estos sistemas de control, es aplicada la teoría de control y teoría de sistema, con la finalidad de diseñar, planificar e implementar estos sistemas con parámetros establecidos y obtener los resultados deseados en un proceso.

El uso de la teoría de control ha llegado a predominar en las diversas estrategias o sistemas de control que han sido desarrolladas a lo largo de los últimos años. Dentro de lo que se conoce como sistemas de control, se puede llegar a encontrar sistemas muy diversos, los cuales dependen del objetivo a controlar, según la información disponible. Una de las herramientas o técnicas, sustentadas en la teoría de control, se

le conoce como un controlador PID, este controlador proporcional, integral, derivativo (PID) es comúnmente utilizado en la mayoría de procesos que requieren de un control más preciso dentro de diversas aplicaciones en la industria [1].

Los controladores PID se consideran que poseen una estructura sencilla y estandarizada. Por tal razón son ampliamente utilizados en el control de procesos industriales, además, este tipo de controlador permite ajustar sus diversos parámetros con una gran facilidad, a pesar de ello, poseen una dinámica lineal, por lo tanto, no son muy útiles en procesos industriales o no industriales que posean características no lineales [1].

No obstante, una gran cantidad de investigadores, trabajan con estos tipos de controladores, siendo diseñados e implementados en diferentes aplicaciones de procesos industriales, aportando nuevo conocimiento sobre esta temática en la comunidad científica y generando más literatura [1]–[7]. Por lo tanto, estos controladores son muy útiles en la industria para cuando el proceso posee una dinámica lineal siendo un controlador convencional. Sin embargo, cuando el proceso posee una dinámica no lineal (de igual forma una dinámica lineal), se pueden utilizar controladores no convencionales, basadas en el control inteligente, proveniente de la inteligencia artificial.

Una de las herramientas o técnicas de la inteligencia artificial para el control de procesos industriales es conocida como un controlador difuso [8], [9]. Un controlador difuso hace uso de la lógica difusa para realizar un control preciso del proceso en ejecución. La lógica difusa se utiliza para automatizar procesos realizando un control difuso de alguna maquinaria y esto se puede efectuar, trasladando los conocimientos y experiencia de un experto hacia una máquina [10]. Además, la lógica difusa también es utilizada para procesar información con incertidumbre [11]–[13].

Por esta razón, a lo largo de los últimos años, la lógica difusa ha sido utilizada para el diseño de controladores difusos en diversas aplicaciones [14], [15], tanto en la comunidad científica como dentro de la industria para el control de procesos con un mejor manejo de la incertidumbre que llegan a presentar estos procesos. Este tipo de controlador ha tenido mucho impacto en las últimas décadas, tanto así, que es un tema de investigación muy amplio y son utilizadas en muchas áreas

como ser en dispositivos de uso cotidiano (aire acondicionado, sistemas de calefacción) [16], control de temperatura [17], [18], control de nivel de pH [19], en máquinas eléctricas utilizadas en la industria [20]–[22], aplicaciones fotovoltaicas [23], [24], entre muchas otras [25], [26]. Estas aplicaciones antes mencionadas hacen de la lógica difusa una temática en expansión para su uso en una gran diversidad de áreas para el control y procesamiento de incertidumbre.

Esto convierte al controlador difuso muy utilizado, sin embargo, el controlador PID sigue siendo uno de los más utilizados. Un control difuso difiere en muchos aspectos en comparación al control convencional, como ser un controlador PID, las características del controlador difuso son las siguientes [27]:

- 1) El control difuso no requiere conocer el modelo matemático que describe la dinámica o funcionamiento del sistema por controlar.
- 2) No necesita aproximar el modelo ni linealizarlo, de igual forma que el controlador PID.
- 3) No requiere identificar el sistema, similar al controlador PID.
- 4) Permite múltiples entradas y salidas, a diferencia del controlador PID, el cual solamente permite una entrada y una salida.

En base a que ambos tipos de controladores, tanto PID como difuso, son muy utilizados, diversos autores han realizado aplicaciones en donde hacen uso tanto de un controlador PID como un controlador difuso, y observan el comportamiento de cada uno y evalúan sus diferencias, realizando un estudio comparativo detallado sobre estos dos tipos de controladores [28]–[32]. En sus investigaciones, los autores afirman que con respecto al diseño de controladores difusos lo más importante es definir las variables lingüísticas de manera adecuada, no necesariamente entre más variables lingüísticas el controlador será mejor. Por otro lado, el control PID posee una alta precisión cuando es bien ajustado, ya que posee sencillez y facilidad al implementarlo.

El uso de un sistema de control en un proceso industrial juega un papel muy importante, sin embargo, otro aspecto a tener en cuenta es el hardware que se utiliza comúnmente en la industria. Por lo general, en los procesos automatizados en la industria, se utiliza con controlador lógico programable (PLC). Por esta razón, se busca diseñar, desarrollar e implementar un controlador difuso aplicado para el control de frecuencia de un motor, siendo una aplicación muy útil dentro de la industria.

Para la presente investigación, se desarrolla el controlador específicamente en un controlador lógico programable (PLC) de Siemens S7-1200. Estos dispositivos son utilizados en la industria en Honduras. Debido a la versatilidad mostrada por este autómata programable se puede desarrollar el controlador difuso para control de frecuencia de un motor.

La versatilidad de estos equipos está permitiendo a investigadores desarrollar algoritmos basados en la inteligencia

artificial, siendo algoritmos mucho más avanzados [33]. Cabe destacar que actualmente, Siemens cuenta con un toolbox para el desarrollo de algoritmos basados en lógica difusa a la venta en su portal. Por tanto, este artículo muestra como desarrollar e implementar un algoritmo de lógica difusa en estos dispositivos. Permite el uso de este algoritmo en algún proceso de control industrial [34].

## II. ANTECEDENTES Y CONCEPTOS

Es necesario tener en cuenta diversos antecedentes y conceptos que permiten el desarrollo adecuada de la presente investigación.

### A. Lógica Difusa

La lógica difusa o también conocida como lógica borrosa es una forma matemática de lograr una representación de la incertidumbre existente en el lenguaje natural. Esta forma matemática fue concebida alrededor de los años sesenta por el ingeniero eléctrico Lofti Zadeh, quien publicó el primer artículo de lógica difusa conocido como Fuzzy Sets [35].

En la lógica clásica o binaria, solamente se permiten dos valores ya sea cero o uno, verdadero o falso. En cambio, la lógica difusa permite todos los valores dentro de cero a uno, permitiendo procesar información con un mayor grado de incertidumbre. El desarrollo de Zadeh, se fue expandiendo esta temática [36]. Hasta el punto donde investigadores aplicaron los conceptos de lógica difusa en el control de procesos, desarrollando de tal manera, los primeros controladores difusos para el proceso de control de alguna aplicación por Ebrahim Mamdani [37], con esta inferencia fue diseñado el controlador difuso de la presente investigación, sin embargo, otros investigadores han desarrollado otras inferencias basadas en la lógica difusa, como ser la teoría de control difuso aportada por Takagi y Sugeno [38], siendo una alternativa del método Mamdani.

Los conjuntos difusos, se asocian los valores o función de pertenencia, donde se busca que un elemento forme parte de un conjunto con un determinado grado de pertenencia [15]. Estos conjuntos difusos son los que representan las entradas y salidas que posee un controlador difuso. Por lo tanto, se deben tener en cuenta los diversos parámetros y operaciones.

Uno de los primeros parámetros de los conjuntos difusos es el universo de discurso, el cual se refiere a la totalidad de elementos que se están clasificando, el universo de discurso se representa con:  $X$ . La función de membresía es la medida de la pertenencia de un elemento al conjunto, el cual va a tener un dominio, que será el universo de discurso y la imagen, es un número real entre 0 y 1, donde 0 se refiere a que no hay pertenencia al conjunto y 1 hay una total de pertenencia, la función de membresía se describe con la notación [35],  $\mu(x)$ , donde:

$$\mu_A = X \rightarrow [0, 1] \quad (1)$$

El valor entre 0 y 1 representa el grado de pertenencia. Aparte de estos parámetros se deben tener en cuenta algunas operaciones que se pueden realizar con los conjuntos difusos,

una de estas operaciones es la intersección [35], los conjuntos difusos se hace uso de la ecuación 2.

$$\mu_C(x) = \min(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

$$\mu_C(x) = \mu_A(x) \wedge \mu_B(x) \text{ para } \forall x \in X \quad (2)$$

La ecuación 2, es utilizada dentro del motor de inferencia en el controlador difuso. Esta operación, en el controlador difuso también se utilizó la operación de unión de los conjuntos difusos [35], la cual también es aplicable en conjuntos clásicos, se representa con la ecuación 3.

$$\mu_C(x) = \max(\mu_A(x), \mu_B(x))$$

$$\mu_C(x) = \mu_A(x) \vee \mu_B(x) \text{ para } \forall x \in X \quad (3)$$

Existen muchas más operaciones que se pueden realizar con los conjuntos difuso, donde la mayoría provienen de la teoría clásica y son aplicados en la lógica difusa. Solamente las operaciones mencionadas fueron utilizadas dentro del controlador difuso diseñado. Aparte de esto, se tomó en cuenta las funciones de membresías para el diseño de controlador, las cuales suelen poseer formas geométricas, como ser una función triangular y una trapezoidal, estos dos tipos de funciones membresías fueron utilizadas para el diseño del controlador difuso [27]. Sin embargo, existen otras funciones de membresía con diferentes características y representación matemática, con la ecuación 4, se obtiene la función de membresía de una función triangular.

$$f(x; a, b, c) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ \frac{c-x}{c-b}, & b \leq x \leq c \\ 0, & x \geq c \end{cases} \quad (4)$$

Donde  $a \leq b \leq c$ , para una función trapezoidal se utilizó la ecuación 5, en donde  $a \leq b \leq c \leq d$ .

$$f(x; a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & x \geq d \end{cases} \quad (5)$$

## B. Controlador Difuso

Un controlador difuso es aquel que permite realizar un control sobre algún proceso en específico, este se encuentra estructurado de 5 partes diferentes, como se muestra en la fig 1.



Fig 1. Diagrama de bloque del controlador difuso

Tal como se muestra en la fig 1, se inicia con el pre-procesamiento, para luego entrar al controlador difuso y aplicar

el método de inferencia, por último, se ejecuta el post-procesamiento [39].

### 1) Pre-Procesamiento

En la primera etapa, se acondiciona las señales antes de que sean introducidas en el controlador difuso, por lo general, se realizan dos funciones antes de llegar al controlador, las cuales son filtrar o amplificar la señal y muestrear la señal.

### 2) Fusificación

Luego, la señal entra al controlador difuso, iniciando con la fusificación de esta señal, donde se convierte la magnitud de la señal en una cantidad difusa, obteniendo el valor de pertenencia que tiene en cada uno de los valores lingüísticos. Donde se reduce a la ecuación 6.

$$\forall x [\mu_{A'}(x) \wedge \mu_{A_i}(x)] = \mu_{A_i}(x_o) \quad (6)$$

Donde  $A'$  es un conjunto singleton dentro del conjunto difuso que lo establece  $x_o$ , el cual es el valor de entrada al controlador difuso y  $A_i$  es la función de membresía en donde está siendo evaluada. Por lo tanto, se dice que la fusificación es la evaluación de la entrada en el conjunto difuso, variando solamente cuando el valor de entrada cambia.

### 3) Reglas de Control

Las reglas de control son el conjunto de reglas lingüísticas SI-ENTONCES, definen el control del sistema, que son utilizadas por el método de inferencia, para el presente diseño de controlador difuso se utilizó el método de inferencia de Mamdani [37], el cual se hacen las operaciones de mínimo y máximo de los conjuntos difuso, tal como se presenta en la ecuación 7.

$$\mu_{B'_1}(y) = \mu_{A_1}(x_o) \wedge \mu_{B_1}(y)$$

$$\mu_{B'_2}(y) = \mu_{A_2}(x_o) \wedge \mu_{B_2}(y)$$

⋮

$$\mu_{B'_n}(y) = \mu_{A_n}(x_o) \wedge \mu_{B_n}(y)$$

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{B'_1}(y) \vee \mu_{B'_2}(y) \vee \dots \vee \mu_{B'_n}(y) \quad (7)$$

Como se muestra en la ecuación 7, se inició con la operación de unión o mínimo (ecuación 2), entre el valor de fusificación  $\mu_{A_1}(x_o)$  del antecedente y entre el consecuente de la regla establecida  $\mu_{B_1}(y)$ , y esto se realiza con cada regla de control. Posteriormente se realiza la operación de unión o máximo (ecuación 3), de lo resultante de la operación anterior  $\mu_{B'_n}(y)$ , generando así el conjunto resultante  $\mu_{B'}(y)$ .

### 4) Defusificación

La última etapa del controlador difuso es la defusificación, del paso anterior se obtiene un conjunto difuso resultante, por lo tanto, esto necesita ser defusificado para entregar un único valor a la salida del controlador. En la defusificación se convierte el conjunto difuso resultante de la inferencia en una

cantidad certera para generar la señal de control. Existen 5 diferentes métodos de defusificación, sin embargo, para el presente controlador se utilizó el centroide, en el cual el conjunto resultante se toma como una función de distribución de masa y se busca calcular el centro de masa o centroide, esto se obtiene a partir de la ecuación 8.

$$y_0 = \frac{\sum y\mu(y)}{\sum \mu(y)} \quad (8)$$

Donde  $y_0$  es el valor de salida final o defusificado. Todas estas ecuaciones mencionadas con anterioridad, fueron utilizadas dentro del PLC para el diseño del controlador difuso.

### 5) Post-Procesamiento

En la última etapa, se genera la señal de control a partir de la cantidad defusificada, donde se acondiciona la señal para el actuador.

### C. Lenguaje de Control Estructurado (SCL)

*Structured Control Language (SCL)* es un lenguaje de programación de alto nivel utilizado en PLC Siemens que está orientado a Pascal y permite una programación estructurada. Este lenguaje de programación va de la mano con la programación de *Structured Text (ST)* basado en la norma DIN EN-61131-3 (IEC 61131-3). El lenguaje SCL permite al desarrollador utilizar elementos del PLC como ser temporizadores, entradas, salidas, marcas entre otros elementos del PLC. [40]

En este lenguaje de programación utilizado por Siemens en sus PLC's, fue diseñado el controlador difuso, realizando cada una de las etapas que esta conlleva desde la fusificación hasta la defusificación, siguiendo el método de inferencia de Mamdani, apoyándose en las bases matemáticas para su desarrollo.

## III. MÉTODOS

A continuación, mostramos el método que permitió el desarrollo de esta investigación. Este método es conocido como incremental. La variable de control es la frecuencia en Hz, con la cual se controlan las velocidades de los motores. Se basa en la implementación por pasos del proyecto. El primer incremental es el desarrollo del control difuso y sus pruebas en Matlab, donde se busca obtener el modelo para implementarse en el PLC. El segundo incremental es el desarrollo del modelo en un bloque de Tia Portal validando funcionamiento con el simulador del programa. Y finalmente el último incremental es la implementación del proyecto en una aplicación de lazo cerrado para control de motores, utilizando un variador de frecuencia, utilizando una entrada y salida analógica de 0-10 V de este dispositivo

### A. Diseño del Controlador Difuso

Para el diseño del controlador difuso se estipularon un total de dos variables lingüísticas, una para la entrada y la otra para la salida del controlador. La variable lingüística de la entrada se denominó como *Error*, la cual es la diferencia entre el setpoint

establecido y la retroalimentación recibida del variador de frecuencia, donde esto, se considera como la etapa de pre-procesamiento de la señal que será entregada al controlador difuso, como se muestra en el diagrama de bloques de la fig 2.

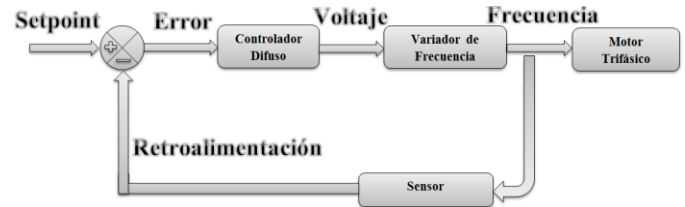


Fig 2. Diagrama de bloque del sistema de control

El valor de la variable lingüística de *Error* es entregado al controlador difuso, donde inicialmente, realiza la fusificación a partir del valor del *Error*, y posteriormente realiza el método de inferencia para entregar un conjunto resultante y finalmente de fusificar este conjunto en un valor certero de *Voltaje*, la cual es la variable lingüística de salida del controlador. El voltaje es entregado al variador de frecuencia, que controla la frecuencia que posee el motor trifásico, esto se considera como la etapa de post-procesamiento. Esta misma frecuencia es retroalimentada al sistema de control para lograr el control requerido del sistema, a causa de esto, se afirma que el sistema de control es de lazo cerrado.

Para la variable lingüística de entrada se le denominó como *Error*, donde su universo de discurso va de -60 a 60 o  $X \in [-60, 60]$ , además, se definieron un total de 5 valores o términos lingüísticos,  $T(x)$ , dentro de esta variable lingüística, donde están representadas por las funciones de membresía, las cuales son las siguientes, y como se muestra gráficamente en la fig 3.

- 1) Muy Baja (Trapezoide)
- 2) Baja (Triangular)
- 3) Cero (Triangular)
- 4) Alto (Triangular)
- 5) Muy Alto (Trapezoide)

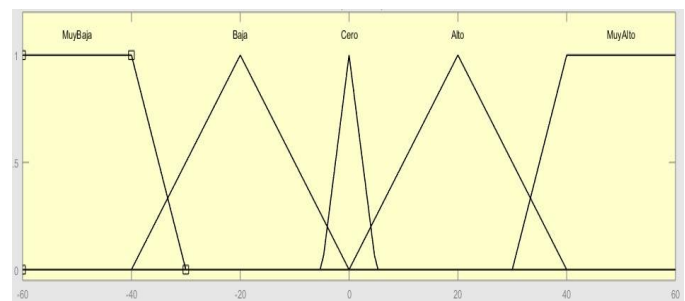


Fig 3. Funciones de membresía del Error

De igual manera, para la variable lingüística de la salida, se estableció su nombre, universo de discurso y funciones de membresía. Esta variable de salida del controlador difuso se denominó como *Voltaje*, la cual posee un universo de discurso que va de 0 a 10 o  $X \in [0, 10]$ , al igual que la entrada, se definió un total de 5 valores o términos lingüísticos,  $T(x)$ , y se establecieron las funciones de membresía de los respectivos

términos lingüísticos, se utilizaron funciones de membresía de tipo triangular y trapezoidal, como se muestra en la fig 4.

- 1) Muy Lento (Triangular)
- 2) Lento (Trapezoide)
- 3) Normal (Triangular)
- 4) Rápido (Triangular)
- 5) Muy Rápido (Trapezoide)

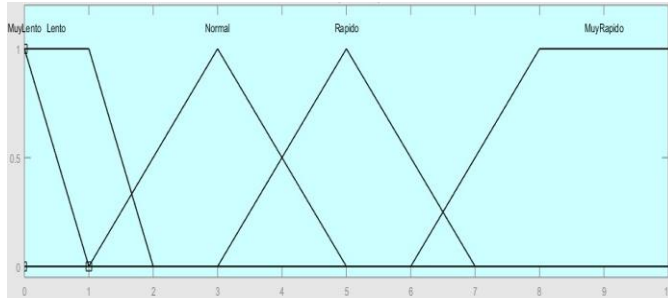


Fig 4. Funciones de membresía del Voltaje

Una vez establecidas las variables lingüísticas tanto de la entrada como de la salida, se procedió a plantear las reglas de control que el motor de inferencia va a evaluar. Se establecieron un total de 5 reglas de control, las cuales se detallan en la tabla 1.

TABLA I. REGLAS DE CONTROL

No.	Regla
1	Si <i>Error</i> es MuyBaja Entonces <i>Voltaje</i> es MuyLento
2	Si <i>Error</i> es Baja Entonces <i>Voltaje</i> es Lento
3	Si <i>Error</i> es Cero Entonces <i>Voltaje</i> es Normal
4	Si <i>Error</i> es Alto Entonces <i>Voltaje</i> es Rápido
5	Si <i>Error</i> es MuyAlto Entonces <i>Voltaje</i> es MuyRápido

En base a las reglas de control estipuladas, se puede observar un comportamiento gráfico de cada regla de control, tal como se muestra en la fig 5.

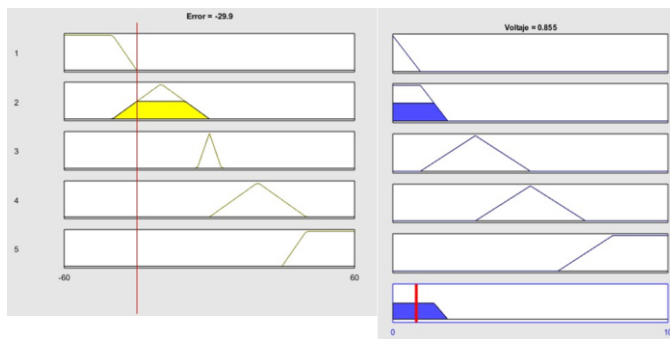


Fig 5. Comportamiento de las reglas de control

En la fig 5, se muestra gráficamente cada función de membresía precedente para su respectiva función de membresía antecedente de acuerdo con las reglas de control establecidas. Finalmente, en base a esto se genera el conjunto difuso resultante, para su posterior defusificación. Posteriormente, se evaluó el comportamiento general del controlador difuso, con las funciones de membresía creadas y las reglas de control, donde el comportamiento de la entrada con respecto a la salida

del controlador, se muestra en un plano bidimensional que se presenta en la fig 6.

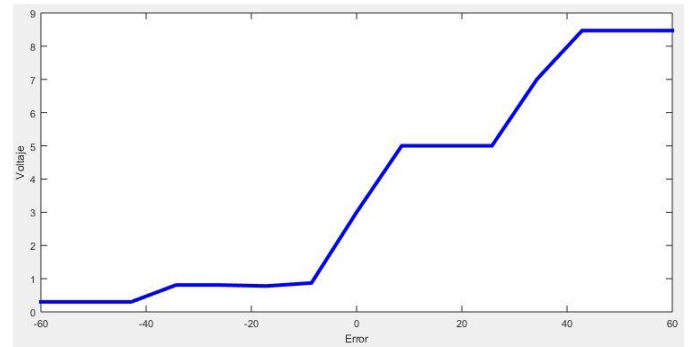


Fig 6. Entrada vs Salida del controlador

En la fig 6, se muestra el comportamiento de la salida según la entrada del controlador difuso, donde a medida el *Error* aumenta, el *Voltaje* de salida también aumenta.

#### IV. RESULTADOS Y ANÁLISIS

##### A. Desarrollo del Controlador Difuso en el PLC

Una vez diseñado el controlador difuso, se procedió a su desarrollo en el control lógico programable (PLC) Siemens S7-1200. Se creó un bloque de función basado en *Structured Control Language* (STL), lenguaje de programación utilizado para programar el controlador difuso, se crearon las variables necesarias para el desarrollo de este controlador, como se muestra en la fig 7.

	Nombre	Tipo de datos	Dirección
1	SetPoint	LReal	%M0.0
2	Retroalimentación	LReal	%M8.0
3	Error(Entrada)	LReal	%M16.0
4	FM_MuyBajo	LReal	%M24.0
5	FM_Bajo	LReal	%M32.0
6	FM_Cero	LReal	%M40.0
7	FM_Alto	LReal	%M48.0
8	FM_MuyAlto	LReal	%M56.0
9	FM_MuyLento	LReal	%M64.0
10	FM_Lento	LReal	%M72.0
11	FM_Normal	LReal	%M80.0
12	FM_Rapido	LReal	%M88.0
13	FM_MuyRapido	LReal	%M96.0
14	Corte	LReal	%M104.0
15	Union	LReal	%M112.0
16	Numerador	LReal	%M120.0
17	Denominador	LReal	%M128.0
18	CONT	LReal	%M136.0
19	Voltaje(Salida)	LReal	%M144.0

Fig 7. Variables del PLC

Tal como se presenta en la fig 7, se establecieron las variables en el PLC, donde se guardó el valor de la entrada y salida y cada función de membresía, entre otras variables necesarias para método de inferencia. Se estipuló que las variables utilizadas dentro de este proceso son de tipo *LReal*, este es un tipo de dato que solamente es permitido en los PLC Siemens S7 versión 1200 y 1500, el cual cuenta con un espacio de almacenamiento de 8 bytes el doble en comparación con el

tipo *Real*, que solamente cuenta con 4 bytes. Se designó este tipo de datos debido a que dentro del proceso de inferencia, se encontraron valores grandes, con más de 15 unidades significativas, por lo tanto, para evitar cualquier inconveniente se decidió utilizar este tipo de datos de Siemens, *LReal*.

Luego, se realizó la etapa de pre-procesamiento, la cual consistió en el cálculo de la diferencia entre el *setpoint* seleccionado y la retroalimentación obtenida por el variador de frecuencia, dando como resultado el *Error*, valor que es la entrada del controlador difuso.

Con este valor de entrada se procedió al proceso de fusificación, donde se obtuvo el valor de pertenencia de cada función de membresía de la entrada del controlador. Este valor de pertenencia de las funciones de membresía de tipo triangular fue calculado con la ecuación 4, donde  $x$ , es el valor de entrada en el controlador, el *Error*,  $a$ ,  $b$  y  $c$  son parámetros del triángulo. Para el valor de pertenencia de las funciones de membresía de tipo trapecoide, se utilizó la ecuación 5, donde  $x$ , es el valor de entrada al controlador, el *Error*,  $a$ ,  $b$ ,  $c$ , y  $d$  son parámetros del trapecoide.

Una vez con el valor de entrada fusificado, se continuó al método de inferencia Mamdani en base a las reglas de control designadas, donde se obtuvo el conjunto resultante final, a partir del cálculo realizado con la ecuación 7, aplicando las respectivas operaciones de mínimo entre la función de membresía del antecedente y el consecuente de cada regla de control designada para finalizar con la operación de máximo entre estos resultantes y generar el conjunto difuso resultante.

Finalmente, con el conjunto difuso resultante, se procedió al cálculo de la salida final del controlador difuso, donde se utilizó la ecuación 8 para calcular esta salida, aplicando el método del centroide. La etapa final, es el voltaje entregado al variador de frecuencia, el cual lo convierte a la frecuencia que es entregada al motor trifásico del sistema de control, esto se le conoce como la etapa de post-procesamiento.

El controlador difuso fue desarrollado solamente en un bloque de función con el uso de código SCL, obteniendo como resultado el bloque que se muestra en la fig 8, donde aquí se realiza desde el proceso de fusificación hasta la defusificación.

Como se muestra en la fig 8, el controlador difuso, cuenta con la respectiva salida de *Voltaje*, al lado derecho, y el valor de entrada, el *Error*, además, se designaron variables para almacenar los respectivos valores de pertenencia de cada función de membresía de las variables lingüísticas.

### B. Pruebas del Controlador Difuso

Una vez desarrollado el controlador difuso en el PLC Siemens S7-1200 se procedió a la realización de las respectivas pruebas, donde primero se inició con una simulación, con valores controlados en través de PLC Simulator y SIMATIC WinCC Runtime Advanced, el cual se obtuvo como la gráfica que se presenta en la fig 9, del comportamiento del controlador difuso desarrollado.

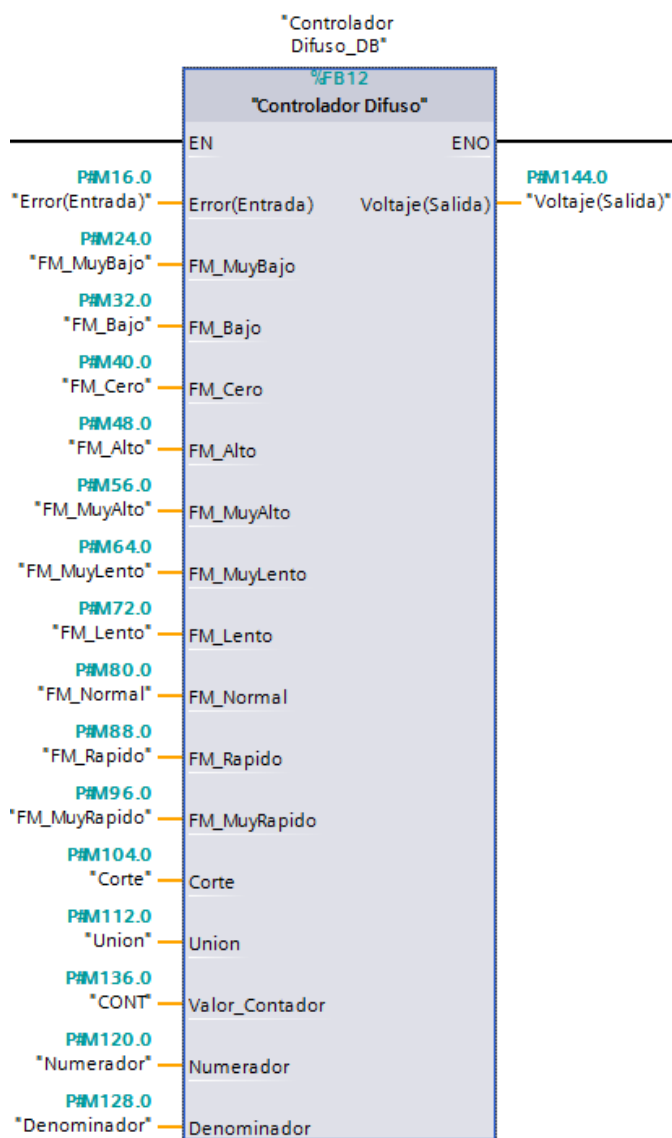


Fig 8. Bloque del controlador difuso

Como se muestra en la fig 9, se estableció como el *setpoint* en un valor de 15 Hz, y se obtuvo un resultado donde el error se ajustaba a cero. Posteriormente, se hicieron las pruebas en una estación de trabajo, donde se realizaron las respectivas conexiones entre el PLC, el variador de frecuencia y el motor trifásico, y se implementó el controlador difuso desarrollado, donde se obtuvo el resultado mostrada en la fig 10.

En la fig 10, se muestra el valor de las variables de *setpoint* (gráfica de color negro), retroalimentación (gráfica de color rojo) y el voltaje de salida (gráfica color azul). Cuando el *setpoint* fue 23 la retroalimentación subió y cuando el *setpoint* bajo a 20 la retroalimentación intento estabilizar el motor es esa frecuencia. Se muestra que la gráfica presenta ciertas perturbaciones, sin embargo, a medida avanza el tiempo estas van disminuyendo, generando un mejor control con el controlador difuso desarrollado.

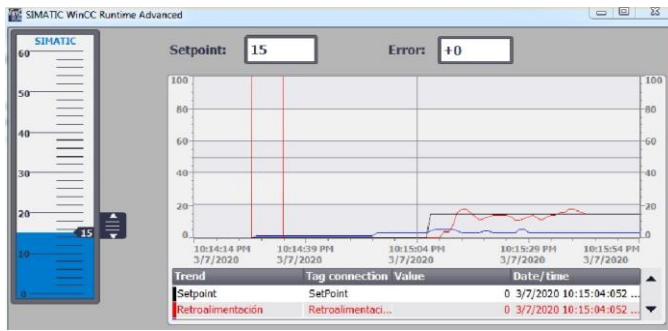


Fig 9. Prueba simulada

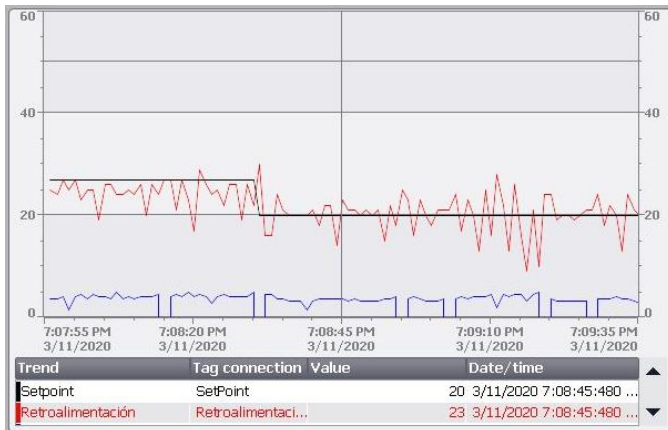


Fig 10. Implementación PLC, Variador, Motor.

## V. CONCLUSIONES

Se logró diseñar, desarrollar e implementar un controlador difuso en un PLC Siemens S7-1200, para controlar la frecuencia entregada por un variador de frecuencia a un motor trifásico, con funciones de membresía de un decimal.

Los resultados obtenidos para operaciones reales presentan un grado de perturbaciones al inicio, seguidamente logran una mejor estabilización. Para eliminar estas perturbaciones se recomienda a futuros investigadores evaluar diversas funciones de membresía y reglas de control, ya que como lo mencionan diversos autores [28], [32]. La cantidad de funciones de membresía en las variables lingüísticas determinarán el desempeño en los sistemas de control difusos. Lo más relevante es conocer el funcionamiento del sistema.

La implementación de este controlador difuso contribuye a la comunidad a desarrollar algoritmos que permitan procesar la incertidumbre y diseñar controladores más complejos en PLC, y poder ser implementados en la industria, donde algunos procesos incrementan su complejidad, incrementando la admisión de varias variables lingüísticas de entrada y salida.

## VI. REFERENCIAS

[1] Kiam Heong Ang, G. Chong, y Yun Li, «PID control system analysis, design, and technology», *IEEE Trans. Control Syst. Technol.*, vol. 13, n.º 4, pp. 559-576, 2005.

[2] V. Michal, C. Prémont, G. Pillonet, y N. Abouchi, «Single active element PID controllers», *20th Int. Conf. Radioelektron. 2010*, pp. 1-4, 2010.

[3] D. Nangru, D. K. Bairwa, K. Singh, S. Nema, y P. K. Padhy, «Modified PSO based PID controller for stable processes», *2013 Int. Conf. Control Autom. Robot. Embed. Syst. CARE*, pp. 1-5, 2013.

[4] I. Nascu, R. D. Keyser, S. Folea, y T. Buzdugan, «Development and Evaluation of a PID Auto-Tuning Controller», *2006 IEEE Int. Conf. Autom. Qual. Test. Robot.*, pp. 122-127, 2006.

[5] M. Tajjudin, H. F. Rahiman, N. Ishar, R. Adnan, y H. Ismail, «Comparison between optimally-tuned PID with self-tuning PID for steam temperature regulation», *2012 4th Int. Conf. Intell. Adv. Syst. ICIAS2012*, pp. 551-556, 2012.

[6] Z. Wu, D. Li, y L. Wang, «Control of the superheated steam temperature: A comparison study between PID and fractional order PID controller», *2016 35th Chin. Control Conf. CCC*, pp. 10521-10526, 2016.

[7] J. E. Martínez Baquero, L. A. Rodríguez Umaña, y F. A. Corredor Chavarro, «Controlador de temperatura y nivel para estanque de alevinos», *16 Th LACCEI Int. Multi-Conf. Eng. Educ. Technol. "Innovation Educ. Inclusion" Lima Perú*, vol. 260, jul. 2018.

[8] M. Santos, «Un Enfoque Aplicado del Control Inteligente», *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind.*, vol. 8, pp. 283-296, 2011.

[9] H. Álvarez, «Control Difuso y Sistemas de Control Inteligentes», *Mem. Segundo Congr. Asoc. Colomb. Automática Bucaramanga Colomb.*, pp. 331-340, 1997.

[10] R. A. Maguiña Pérez, «Sistemas de inferencia basados en lógica borrosa: Fundamentos y caso de estudio», *Rev. Investig. Sist. E Informática*, vol. 7, n.º 1, pp. 91-104, 2010.

[11] C. A. Díaz Contreras, A. Aguilera Rojas, y N. Guillén Barrientos, «Lógica difusa vs. modelo de regresión múltiple para la selección de personal», *Ingeniare Rev. Chil. Ing.*, vol. 22, n.º 4, pp. 547-559, may 2014.

[12] F. J. Ruvalcaba Coyaso y A. Vermonden, «Lógica difusa para la toma de decisiones y la selección de personal», *Univ. Empresa*, vol. 17, n.º 29, pp. 239-256, abr. 2015.

[13] M. Apaza Luque, J. Manotupa Gil, F. Salas Flores, y J. Sulla Torres, «Gestión de aparcamientos de cocheras utilizando técnicas de clasificación, lógica difusa y algoritmos evolutivos», *16 Th LACCEI Int. Multi-Conf. Eng. Educ. Technol. "Innovation Educ. Inclusion" Lima Perú*, vol. 209, jul. 2018.

[14] O. Duarte, «Aplicaciones de la Lógica Difusa», *Rev. Ing. E Investig.*, vol. 45, n.º 1, pp. 5-12, abr. 2000.



- [15] D. Guzmán y Castaño M., «La Lógica Difusa en Ingeniería: Principios, Aplicaciones y Futuro», *Cienc. Tecnológica*, vol. 24, n.º 2, pp. 87-107, 2006.
- [16] T. L. Acevedo Gauta y C. Martínez Quintero, «Diseño de un Controlador Lógico Difuso para una sistema de calefacción», *Fifth LACCEI Int. Lat. Am. Caribb. Conf. Eng. Technol. LACCEI'2007 "Developing Entrep. Eng. Sustain. Growth Lat. Am. Caribb. Educ. Innov. Technol. Pract.*, vol. 228, 2007.
- [17] Y. Santafé Ramón, «Diseño de un controlador de temperatura difuso», *Rev. Matices Tecnológicos*, vol. 2, n.º 1, pp. 1-10, dic. 2010.
- [18] D. J. López Amado, D. García, L. Davico, y S. Verrastro, «Controlador Difuso Multivariable del Perfil de Temperatura de un Horno», *XI Reunión Trab. En Proces. Inf. Control*, pp. 429-434, sep. 2005.
- [19] C. A. Rocha y J. R. Escorcía Gutiérrez, «Neutralización de los Nivel de pH por medio de Lógica Difusa», *Eighth LACCEI Lat. Am. Caribb. Conf. Eng. Technol. LACCEI'2010 "Innovation Dev. Am. Arequipa Perú*, vol. 149, jun. 2010.
- [20] F. Reyes Barrera, A. Pardo García, y F. Viloría, «Diseño de un Controlador Difuso en Modo Deslizante para un Motor de Inducción Trifásico», *17 Th LACCEI Int. Multi-Conf. Eng. Educ. Technol. "Industry Innov. Infrastruct. Sustain. Cities Communities" Jam.*, vol. 403, jul. 2019.
- [21] J. Párraga, P. Remuzgo, J. Tisza, y M. Chauca, «Lógica difusa y conocimiento experto en la gestión del ciclo de la vida de transformadores de potencia en la mina cobriza», *17 Th LACCEI Int. Multi-Conf. Eng. Educ. Technol. "Industry Innov. Infrastruct. Sustain. Cities Communities" Jam.*, vol. 381.
- [22] M. Baban, C. Florin Baban, y M. Darius Suteu, «Maintenance Decision-Making Support for Textile Machines: A Knowledge-Based Approach Using Fuzzy Logic and Vibration Monitoring», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 83504-83514, 2019.
- [23] C. Robles y G. Villa, «Control del punto de máxima potencia de un panel solar fotovoltaico, utilizando lógica difusa», *Rev. Telématiche*, vol. 10, n.º 2, pp. 54-72, ago. 2011.
- [24] M. Hannan, Z. Ghani, M. Hoque, A. Hussain, y A. Mohamed, «Fuzzy Logic Inverter Controller in Photovoltaic Applications: Issues and Recommendations», *IEEE Access*, vol. 7, pp. 24934-24955, feb. 2019.
- [25] M. Luján Corro y V. Vásquez Villalobos, «Control automático con lógica difusa de la producción de cerveza artesanal en las etapas de maceración y cocción», *Sci. Agropecu.*, vol. 1, n.º 2, pp. 125-137, 2010.
- [26] E. Rivera Mujica y P. Huamaní Navarrete, «Aplicación de la Lógica Difusa en el Control de un Proceso de Prototipo de Pintado», *16th LACCEI Int. Multi-Conf. Eng. Educ. Technol. "Innovation Educ. Inclusion" Lima Perú*, vol. 565, jul. 2018.
- [27] P. Albertos y A. Sala, «El Control Borroso: Una Metodología Integradora», *Rev. Iberoam. Automática E Informática Ind.*, vol. 1, n.º 2, pp. 22-31, jul. 2004.
- [28] J. Díaz y F. Muñoz, «Comparación entre un Controlador Difuso y un Controlador PID para un Motor Universal», *ENGI Rev. Electrónica Fac. Ing.*, vol. 1, n.º 2, p. Julio, 2013.
- [29] R. K. Chauhan, B. S. Rajpurohit, R. E. Hebner, S. N. Singh, y F. M. G. Longatt, «Design and analysis of PID and fuzzy-PID controller for voltage control of DC microgrid», *2015 IEEE Innov. Smart Grid Technol. - Asia ISGT ASIA Bangk.*, pp. 1-6, 2015.
- [30] A. Palencia Díaz, «Estudio de Diferentes Estrategias de Control para un Tanque de Mezclado: PID, Control de Matriz Dinámica (DMC) y Lógica Difusa (FLC)», *Prospectiva*, vol. 8, n.º 1, pp. 43-51, jun. 2010.
- [31] M. H. Khamsehei Fadaei, A. Zalaghi, S. G. Rahmat Alhosseini Ghochan Atigh, y Z. Torkani, «Design of PID and Fuzzy-PID Controllers for Agile Eye Spherical Parallel Manipulator», *2019 5th Conf. Knowl. Based Eng. Innov. KBEI Tehran Iran*, pp. 113-117, 2019.
- [32] A. Ferreyra y R. Fuentes, «Estudio comparativo entre control PID y Difuso», *SOMI XV Congr. Instrum.*, 2000.
- [33] L. E. García Jaimes y M. Arroyave Giraldo, «Controladores Avanzados en PLC», *Rev. Politécnica*, vol. 8, n.º 14, pp. 57-66, 2012.
- [34] Siemens, *SIMATIC S7: Fuzzy Control; User Manual*. Nürnberg: Siemens AG, 1996.
- [35] L. A. Zadeh, «Fuzzy Sets», *Inf. Control*, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [36] L. A. Zadeh, «Outline of a new approach to the analisis of complex systems and decision processes», *IEEE Trans. Syst. Man Cibern.*, vol. 3, pp. 28-44, ene. 1973.
- [37] E. H. Mamdani y S. Assilian, «An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller», *Int. J. Mach. Stud.*, vol. 7, n.º 1, 1975.
- [38] T. Takagi y M. Sugeno, «Fuzzy identification of systems and its applications to modelling and control», *IEEE Trans. Syst. Man Cibern.*, vol. 15, n.º 1, pp. 116-132, 1985.
- [39] C. C. Lee, «Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller-Part I», *IEEE Trans. Syst. Man Cibern.*, vol. 20, n.º 3, pp. 404-418, 1990.
- [40] Siemens, *Módulo TIA Portal 051-201: Programación en lenguajes de alto nivel con SCL y SIMATIC S7-1200*. Nürnberg: Siemens AG, 2018.

