

# IMPLEMENTACIÓN DE UN MÓDULO DIDÁCTICO PARA CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA Y CAUDAL

**WILMER BOLIBAR TIPANLUISA SARCHI**

*Facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, ESCUELA POLITÉCNICA DEL EJÉRCITO*

*Av. Progreso S/N, Sangolquí, Ecuador*

wilmerbts@hotmail.com

**Resumen.- La lógica difusa puede ser una solución alternativa a la creación de modelos matemáticos de sistemas de control de procesos, permitiendo emular en cierto sentido el pensamiento humano.**

## I INTRODUCCIÓN

Lógica difusa (FL) es una lógica multi-valuada que permite (por medio de conjuntos de pertenencia) una forma más práctica de enfocar los problemas como se ven en el mundo real. Al contrario que la información binaria (si/no), la lógica difusa emula la habilidad de razonamiento y hace uso de datos aproximados para encontrar soluciones precisas.

Se puede configurar un sistema difuso para mapear entradas en salidas, con el mismo propósito que cualquier otro sistema de computación<sup>[4]</sup>.

Básicamente, consiste de 3 etapas: fusificación, evaluación de reglas y defusificación.

Fusificación, es un proceso de traducción para obtener la representación

difusa a partir de los valores actuales (por ejemplo, temperatura), para lo cual utiliza las funciones de pertenencia. Evaluación de reglas o inferencia difusa, es la forma de producir respuestas numéricas difusas a partir de reglas lingüísticas aplicadas a los valores difusos de entrada. Defusificación, es un proceso de traducción que permite obtener un valor numérico representativo de todas las salidas a partir de la información difusa que produce la evaluación de reglas.

## VENTAJAS DE LA LÓGICA DIFUSA

- No requiere construcciones matemáticas complejas.
- Uso de lenguaje natural
- Facilidad de configuración
- Si bien la inferencia se realiza por medio de lógica difusa, se obtienen resultados precisos
- Fácil adaptación a trabajos en colaboración con otras técnicas

## DESVENTAJAS DE LA LÓGICA DIFUSA

- Se debe entender y ser capaz de definir el problema
- Se deben evaluar y ajustar los resultados

## II FUNDAMENTOS DE LÓGICA DIFUSA

En general un sistema basado en lógica difusa (FLS) es un mapeo no lineal de datos de entrada en una salida escalar, geoméricamente, como es hecho comúnmente en la literatura de control difuso.

Un sistema de control difuso mapea entradas o valores actuales en salidas. Contiene 4 componentes: reglas, fusificador, motor de inferencia y defusificador.

Las reglas pueden ser provistas por expertos o extraídas de datos numéricos.

En todo caso, las reglas son expresadas como una colección de sentencias IFTHEN. De las reglas se debe conocer:

1) Variables lingüísticas en contraposición a los valores numéricos de una variable (muy\_calido vs 36 grados centígrados). El valor numérico 36° C es interpretado de acuerdo a funciones de pertenencia asociadas a cada variable lingüística, y su semántica permite representar con un valor difuso cuanto pertenece el valor numérico a cada variable lingüística.

2) La cuantificación de variables lingüísticas que es realizada usando funciones de pertenencia (la variable u1 debe tomar un valor de pertenencia al término lingüístico asociado, en el rango muy\_calido a muy\_frio). Si la variable temperatura tiene las variables lingüísticas: muy\_calido, calido, frio y muy\_frio; el valor 36° puede tomar los valores muy\_calido=1, calido=0.3, frio=0 y muy\_frio=0.

3) Los conectores lógicos para variables lingüísticas (and, or, ...).

4) Las implicaciones (IF a THEN b).

5) Como combinar un conjunto de reglas.

El fusificador mapea valores numéricos en conjuntos difusos. Es necesario para activar reglas, que están en términos de variables lingüísticas y tienen asociados conjuntos difusos. Si la variable temperatura toma el valor 36° C, al fusificar el valor se obtiene la pertenencia a todos los conjuntos difusos, de tal forma que puede ser válido que muy\_calido=1, calido=0.3, frio=0 y muy\_frio=0.

El motor de inferencia de un FLS mapea conjuntos difusos en conjuntos difusos. Maneja la forma en la cual las reglas son combinadas. Como los humanos usan distintos tipos de procesos de inferencia, para entender cosas o tomar decisiones, un FLS puede usar distintos procedimientos de inferencia difusa. Solo se usan unos pocos procedimientos en aplicaciones FL.

El defusificador mapea conjuntos de salida difusos en números. En aplicaciones de control, tales números corresponden a la acción de control a tomar.

En la siguiente figura. 1 se observa el sistema de lógica difusa con sus respectivas partes

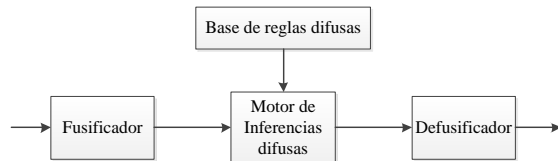


Figura 1. Sistema de lógica difusa

### III DISEÑO E IMPLEMENTACIÓN DEL CONTROLADOR DIFUSO

#### Diseño del control de Temperatura

Para un mejor conocimiento del control a realizar, se ilustra en la Figura. 2 el diagrama de instrumentación, como se observa la parte encerrada en un círculo es la instrumentación utilizada en el control de temperatura.

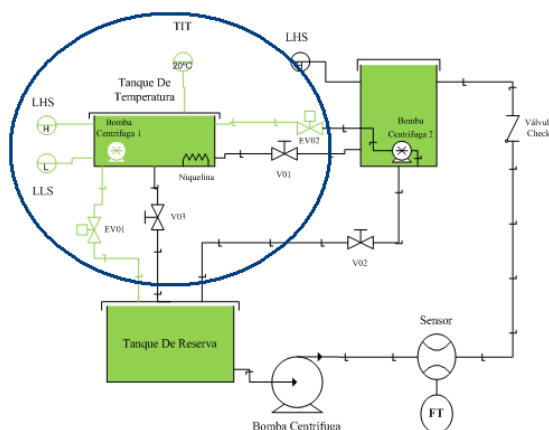


Figura. 2. Diagrama de instrumentación

Es necesario calcular la potencia requerida mediante la siguiente ecuación de energía.

$$E = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

Donde:

m: masa(kg)

Cp: Calor específico del agua ( $\frac{J}{Kg^{\circ}C}$ )

$\Delta T$ : Variación de temperatura ( $^{\circ}C$ )

E: Energía (J)

P: Potencia (w)

t: Tiempo (seg)

$$\Delta T = 50 - 20 = 30^{\circ}C$$

$$\rho = \frac{m}{V}$$

$$m = \rho \cdot V$$

$$m = 1000 \frac{Kg}{m^3} \cdot 0.004m^3$$

$$m = 4kg$$

$$C_p = 4186 \frac{J}{Kg^{\circ}C}$$

$$E = m \cdot C_p \cdot \Delta T$$

$$E = 4Kg \cdot 4186 \frac{J}{Kg^{\circ}C} \cdot 30^{\circ}C$$

$$E = 502080J$$

$$P = \frac{E}{t}$$

$$P = \frac{502080J}{300s} = 1620w \approx 1500w$$

## Modelo del sistema de temperatura

Cuando es de interés estudiar un fenómeno, es necesario hacer una abstracción, para poder concentrarse solo en el fenómeno en cuestión, porque de lo contrario, si se consideraran todas las variables, sería muy difícil y hasta imposible, y muchas veces esas otras variables, no tienen mucha influencia en el fenómeno en cuestión, por lo que es importante el modelo matemático que es: “ un sistema conceptual simplificado que reemplaza a otro sistema real o conceptual más complejo”, es decir, que puede extraerse de un modelo, otro modelo más simple. Por lo tanto se ha obtenido un modelo matemático para la planta de temperatura y para la planta de caudal permitiendo de esta manera simular los controles sin necesidad de usar la planta real.

El modelo matemático del sistema está basado en la ecuación de balance de energía como se muestra a continuación.

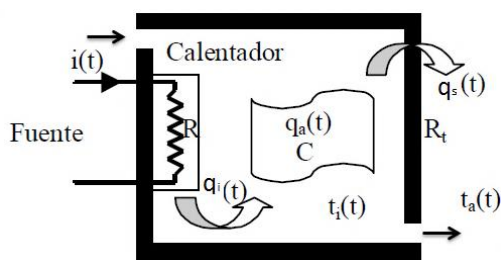


Figura 3. Proceso térmico.

Energía de entrada = Energía que sale +  
Energía que se acumula.

$$q_i = q_s + q_a$$

$$q_i = R * i(t)^2 = \frac{V(t)^2}{R}$$

$$q_a = C \frac{dt_i(t)}{dt}$$

$$q_s = \frac{(t_i(t) - t_a(t))}{R_t}$$

Donde:

- q<sub>i</sub>: Flujo de calor de entrada
- q<sub>a</sub>: Flujo de calor acumulado
- q<sub>s</sub>: Flujo de calor de salida
- R: resistencia térmica
- C: Capacitancia térmica
- R<sub>t</sub>: Resistencia térmica del recipiente

A partir de las ecuaciones obtenidas anteriormente basadas en el balance de energía se ha derivado el siguiente diagrama de bloques que representa el modelo matemático.

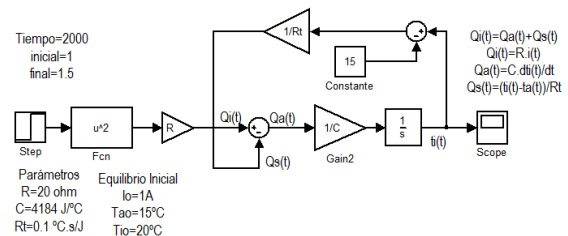


Figura 4. Modelo no lineal.

## Sintonización del controlador Pi difuso

A partir de los parámetros del PID convencional se dispuso a sintonizar un controlador Pi difuso con las siguientes entradas:

$$e(t) = r(t) - y(t) \text{ y } \int e(t)$$

Para hallar los valores de K<sub>p</sub>, T<sub>i</sub> y T<sub>d</sub> se utilizara el Método de oscilación de Ziegler-

Nichols, este método es válido sólo para plantas estables a lazo abierto como se muestra en la siguiente figura [3].

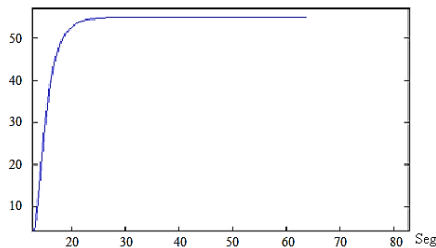


Figura 5. Respuesta estable a lazo abierto.

Los parámetros PID convencionales se obtienen de la siguiente forma:

1. Aplicar a la planta sólo control proporcional con ganancia  $K_p$  pequeña.
2. Aumentar el valor de  $K_p$  hasta que el lazo comience a oscilar.
3. Registrar la ganancia crítica  $K_p = K_c$  y el período de oscilación  $P_c$  de  $u(t)$ , a la salida del controlador.
4. Ajustar los parámetros del controlador PID de acuerdo a la tabla.

	$K_p$	$T_i$	$T_d$
P	$0,5K_c$	-	-
PI	$0,45K_c$	$P_c/1,2$	-
PID	$0,6K_c$	$P_c/2$	$P_c/8$

Tabla. 1. Parámetros de controladores PID según el método de oscilación de Ziegler-Nichols.

Para hallar la ganancia crítica, este método se aplica en un proceso a lazo cerrado, como el que se muestra en la Figura, el sistema a lazo cerrado tiene una ganancia

crítica ( $K_c$ ), la cual corresponde con el límite de estabilidad del sistema a lazo cerrado.

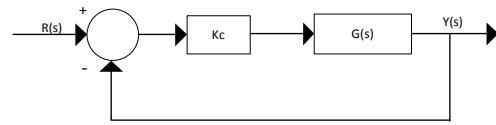


Figura. 6. Esquema de Control.

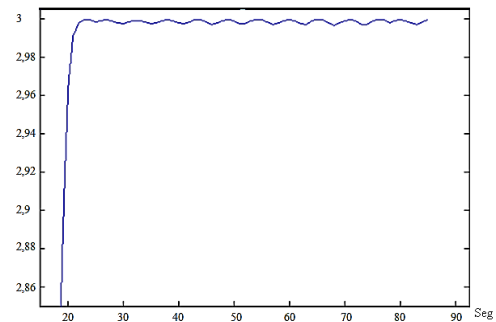


Figura. 7. Respuesta de la planta para un control proporcional en lazo cerrado.

En la figura 7 se muestra un  $k_c=2,5$  se tiene un período de oscilación  $P_c=16$  seg como se puede observar, aplicando las formulas del Método de oscilación de Ziegler-Nichols obtenemos:

$$K_p = 0,45k$$

$$K_p = 0,9$$

$$T_i = p_c/1,2$$

$$T_i = 14$$

Las ganancias  $G_E$ ,  $G_{CE}$  y  $G_U$  para la sintonía de un controlador PD difuso a partir de los parámetros del PI convencional, propuesto por Jan Jantzen [1] son:

$$K_p = G_E * G_U$$

$$T_d = \frac{G_{CE}}{G_E}$$

$$\frac{1}{Ti} = \frac{GIE}{GE}$$

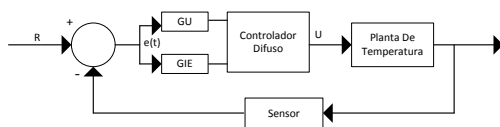
Dado que el universo normalizado de discurso del error está determinado en el rango de [-50 50], el primer ajuste se considera que  $GE=0.5$  de esta manera las constantes del controlador difuso quedan como:

$$GE = 0.5$$

$$Gu = \frac{1.2}{0.5} = 2.4$$

$$GIE = \frac{0.5}{14} = 0.03$$

De esta manera el lazo de control resultante se representaría como se muestra en la figura. 8.



**Figura. 8. Lazo de control para la planta de temperatura.**

## Control De Caudal

Al analizar sistemas que implican el flujo de líquidos, resulta necesario dividir los regímenes de flujo en laminar y turbulento, de acuerdo con la magnitud del número de Reynolds. Si el número de Reynolds es mayor que 3000, el flujo es turbulento. El flujo es laminar si el número de Reynolds es menor que 2000.

$$Re = \frac{\rho * v * d}{u}$$

Donde:

Re = Numero de Reynolds

d = Diámetro del ducto

v = Velocidad promedio del liquido

$\rho$  = Densidad del líquido

u= Viscosidad del liquido

$$A = 0.03 \text{ m}^2$$

$$Q = A * v$$

$$Q = 0.06 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$$

$$V = 2 \frac{\text{m}}{\text{s}}$$

$$Re = \frac{0.2\text{m} * 2 \frac{\text{m}}{\text{s}} * 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}}{1002 * 10^{-6} \frac{\text{kg}}{\text{ms}}}$$

$$Re = 399201,5968$$

En este sistema el líquido sale a chorros a través de la bomba a un lado del tanque y debido a que el flujo es turbulento, el caudal en estado estable se obtiene mediante

$$Q = K\sqrt{H}$$

Donde:

Q = Caudal del líquido en estado estable,  $\text{m}^3/\text{seg}$

K = coeficiente,  $\text{m}^{2.5}/\text{seg}$

H = altura en estado estable, m

Por lo que el modelo matemático del sistema basado en la ecuación de balance de energía queda:

$$q_i = q_s + q_a$$

$$q_a = A \frac{dh}{dt}$$

$$q_s = k\sqrt{h}$$

$$q_i = k\sqrt{h} + A \frac{dh}{dt}$$

A partir de la ecuación hallada anteriormente se obtiene el siguiente diagrama de bloques que representa el modelo matemático de la planta de caudal como se observa en la Figura. 9.

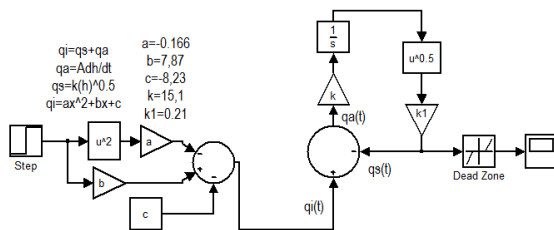


Figura. 9. Modelo no lineal.

### Sintonización del controlador Pi difuso

Aplicando el mismo método descrito anteriormente, para un  $K_p=3=K_c$  tenemos un período de oscilación  $P_c=16$  seg obtenido para el control de caudal, aplicando las formulas del Método de oscilación de Ziegler-Nichols obtenemos:

$$K_p = 0,45k_c$$

$$K_p = 1,35$$

$$T_i = p_c/1,2$$

$$T_i = 13,3$$

Las ganancias GE, GCE y GU para la sintonía de un controlador PI difuso a partir

de los parámetros del PI convencional propuestas por Jan Jantzen [1] queda:

$$GU = \frac{1,35}{0,5} = 2.7$$

$$GIE = \frac{GE}{T_i}$$

$$GIE = \frac{0,5}{13,3} = 0,04$$

### INFORMACIÓN DEL SISTEMA CONSTRUIDO

El hardware implementado en el presente proyecto de grado está constituido por una planta, un computador de escritorio, una tarjeta de adquisición de datos PCI 6221, un conector SCB-68, un cable tipo SHC68-68-EPM, una tarjeta de acoplamiento de señales y cableado en general como se muestra en la Figura. 10.

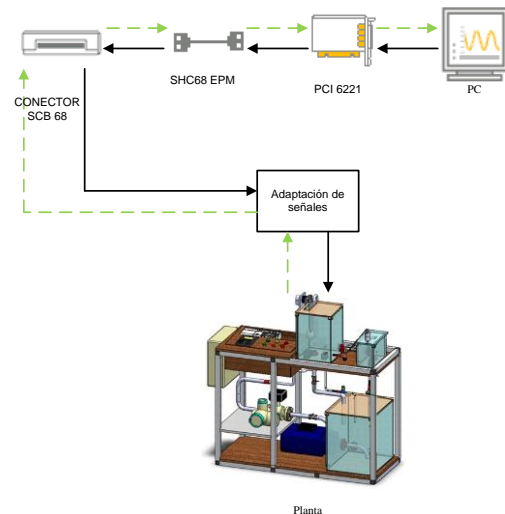


Figura. 10. Diagrama General de Componentes Del Sistema.

## IV CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

### Conclusiones

- En el modelo Mamdani difuso la representación de las reglas difusas es más simple, lo que facilita su interpretación.
- El modelo Mamdani difuso para sistemas complejos no lineales usualmente requiere muchas reglas difusas Si-Entonces, lo que aumenta su complejidad.
- Para el control difuso se utilizó el modelo Takagi-Sugeno ya que este puede representar relaciones complejas y no lineales en un conjunto con un pequeño número de reglas difusas en comparación con el modelo Mamdani.
- El modelo matemático del sistema tanto del caudal como temperatura puede ser muy simple o muy compleja dependiendo de la exactitud con la que se quiera hallarlo, debido a esta razón todos los modelos matemáticos que se puedan hallar son validos.
- El modelo matemático ayuda a realizar la simulación del sistema de una manera rápida y segura si se desea probar un controlador antes de ejecutar físicamente y no causar algún daño en caso de no estar bien realizado el control.
- Debido a que Simulink no es un programa dedicado al desarrollo de interfaces de usuario, se dificultó en muchas ocasiones la asociación de variables o valores de interés para el monitoreo del control.
- Ya que en la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments solo puede ingresar voltaje, se tuvo que realizar un conversor de corriente a voltaje y esto genero un ruido en la señal obtenida.
- Se comprobó que el control difuso se puede aplicar de manera rápida sin realizar el modelamiento matemático del sistema solo en base a la experiencia del operario.
- El control de temperatura se complico debido a su inercia térmica, ya que si se lo calienta demasiado la única manera de enfriarlo es ingresando agua fría esto provoca un cambio brusco en la temperatura.
- La aplicación de un PWM es una solución al control de temperatura ya que este ayuda a mantener más estable la temperatura y evita variaciones bruscas.
- Una manera de sintonizar el control PID difuso es mediante el criterio integral de error cuadrático para de esta manera saber cuáles son las ganancias más apropiadas para el controlador.
- Las ganancias para un PID difuso se las pueden hallar mediante una relación con las ganancias del PID clásico propuestas por Jan Jantzen.



## Recomendaciones

- Revisar el manual de usuario antes de realizar algún trabajo sobre el módulo didáctico utilizando la tarjeta de adquisición de datos de National Instruments.
- Conectar y encender todas las fuentes de alimentación necesarias para el funcionamiento del módulo didáctico.
- Tener cuidado al manipular el módulo didáctico ya que se maneja corrientes elevadas en especial para el control de temperatura.
- Estudiar y conocer en su totalidad lo que se está realizando antes de ejecutar cualquier actividad, para evitar algún daño a los instrumentos.
- Usar programas de software libre para evitar problemas de licencias.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

[1] Jantzen Jan, "Tuning of Fuzzy PID Controllers", Technical University of Denmark: Department of Automation, lecture notes, 1998.

[2] Z. Lotfí. Fuzzy Logic Toolbox, User's Guide. Versión 2. The Math Works, Inc. 1995.

[3] Kuo Benjamín C., "Sistemas de Control Automático", Editorial Prentice Hall, Séptima edición, 1996.

[4] Kevin M. Passino, Stephen Yurkovich, "Fuzzy Control", Department of Electrical

Engineering The Ohio State University, 1998.

## BIBLIOGRAFÍA DEL AUTOR



Nació el 16 de febrero de 1987 en la parroquia del Quincho perteneciente al cantón Quito, provincia de Pichincha, Ecuador.

Sus estudios primarios los realizó en la escuela Fiscal Mixta Pio Jaramillo Alvarado y los secundarios los terminó en el colegio "Cardenal De La Torre" mixto distándose siempre por todo aquello que estaba relacionado con tecnología y sus afines.

Obtuvo su título de Ingeniería en Electrónica, Automatización y Control en el año 2012.

Uno de sus campos de interés destaca el control de procesos y control inteligente.