

## Automatización de un sistema de calefacción utilizando estrategias de control difuso

Esteban Piemontese<sup>†</sup>, Gustavo Sieben<sup>†</sup>

Asesor: José R. Vignoni<sup>†</sup>

<sup>†</sup>TDto. De Electrotecnia, Facultad de Ingeniería, UNLP  
votasugs@yahoo.com.ar

**Resumen**— En los sistemas de calefacción para pequeñas oficinas u hogares (tanto antiguos como algunos modernos), es muy común encontrar un método de control basado en estrategias de control de encendido y apagado del dispositivo calefactor (on-off), como también mediciones de temperaturas indirectas (por ejemplo temperatura del agua, vapor o aire a la salida del dispositivo calefactor) usadas como indicador del confort de climatización para los ambientes. El presente trabajo estudia la posibilidad de adecuar el tipo de control on-off a técnicas más recientes, para proveer una mejora en el rendimiento, en el confort (regulación de la climatización de los recintos más relacionada con la temperatura del ambiente) y en la comodidad de manejo. Se reemplazará el control on-off analógico por un control digital, aplicando estrategias de control difuso.

**Palabras Clave**— Automatización. Control difuso. Modelización de plantas.

### I. INTRODUCCIÓN

Se dispone de una caldera de calefacción por agua caliente de circulación forzada, la cual funciona con un control analógico tipo on-off, donde el lazo cerrado de control se basa en el sensado de la temperatura del agua a la salida de la caldera. Esta se compara con un valor de referencia en el termostato, el cual comanda una válvula solenoide (on-off) que provee la alimentación de gas natural al quemador principal.

### II. DESARROLLO

#### A. Descripción de la Planta

Los sistemas de calefacción colectivos o centrales (Giacomi *et al.*, 1973) son aquellos donde hay un solo hogar o unidad de calentamiento por edificio. Estos permiten mejores condiciones de confort y además climatizar uniformemente toda la unidad habitacional. En nuestro caso trabajaremos con un sistema de calefacción por agua caliente con circulación forzada a

presión atmosférica. Los elementos constitutivos de este método de calefacción (Fig. N°1) son:

- Generador de calor o caldera
- Calefactores (convectores o radiadores)
- Tuberías de envío y retorno del agua
- Tanque de expansión
- Equipo de control
- Bomba de recirculación

El **generador de calor o caldera**. Hay básicamente dos tipos de calderas, uno es la humotubular, aquí parte de la llama y los gases de la combustión se dirigen a ductos o caños que atraviesan el recipiente que contiene el agua; y el otro es la acuotubular donde al contrario de la anterior, el agua es la que circula por ductos o caños a través del hogar de la caldera. La eficiencia térmica de las calderas (Giacomi *et al.*, 1973) depende de la superficie de calefacción, esta puede ser directa, si la superficie de calefacción se encuentra en contacto con las llamas incandescentes (tamaño reducido de caldera y bajo rendimiento), o indirecta, donde los gases de la combustión se encargan de transferir su energía a la superficie de calefacción (tamaño abultado alto rendimiento). En cuanto a los combustibles pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, este último representa indudables ventajas como limpieza y control de consumo. Nuestra planta cuenta con una caldera humotubular, de calentamiento directo/indirecto, con una capacidad térmica de 24000 Kcal/h, la cual entrega a un contenedor de agua de 120 litros, por medio de un quemador de gas natural. Este tiene un consumo de gas en estado encendido de 4m<sup>3</sup>/h y considerando un poder calorífico de 9253 Kcal/m<sup>3</sup>, la potencia del quemador es de aproximadamente 37000 Kcal/h.

Los **calefactores** son intercambiadores de calor entre el agua y los respectivos ambientes a climatizar. Existe una amplia gama de estos elementos, los más utilizados son los radiadores, convectores, calventores y paneles radiantes. Nuestra planta cuenta con 2 radiadores de fundición de hierro de 6 columnas, los cuales no disponen de válvulas by-pass de paso para controlar el paso del agua caliente y de 12 convectores de tres tubos de cobre con aletas del mismo material y colectores de hierro fundido para transmitir el calor.

Las **tuberías de envío y retorno del agua** enlazan los diferentes elementos de la instalación. Se dispone de una distribución inferior, donde el agua de salida de la caldera se envía desde el nivel inferior hacia los superiores del edificio. Los calefactores se conectan a dos cañerías independientes, una de envío y otra de retorno. El material de las tuberías es de acero galvanizado y aisladas con capas de lana de vidrio envueltas en cartón corrugado

El **tanque de expansión** permite la libre dilatación del líquido contenido en el sistema cuando experimenta una elevación de temperatura y mantiene una cantidad constante de agua dentro del sistema reponiendo las pequeñas pérdidas de agua por evaporación o fugas. Es de un volumen máximo de 37,5 litros y el volumen de agua a 25°C de temperatura es de 22,5 litros.

Las **etapas de control** se encargan de supervisar automáticamente el funcionamiento, según el monitoreo de ciertas variables. La planta cuenta con el control de regulación más antiguo, simple, económico y eficiente, el control encendido-apagado (on-off). El quemador funciona a capacidad total constante o no funciona, comandado por un termostato electromecánico que corta el gas del quemador principal mediante una válvula solenoide de 220Vca cuando el monitoreo de la temperatura del agua a la salida de la caldera alcanza el valor de referencia (control on/off, con una histéresis de 5°C aproximadamente).

Por último la **bomba de recirculación** es la encargada de mantener un caudal constante de agua por el conjunto del circuito (forzado), facilitando la rapidez de transmisión de calor en los calefactores y estabilizando sus temperaturas de trabajo. Contamos con una bomba centrífuga de 1/12Hp, que gira a 2800rpm y la alimentación es de 220Vca.

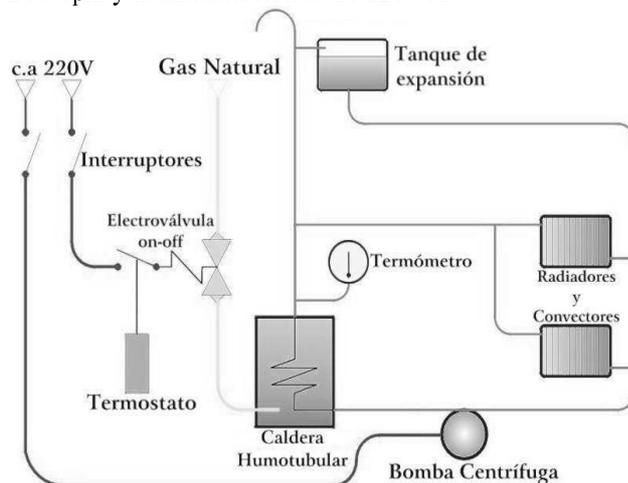


FIGURA N°1: Diagrama general de la instalación.

### B. Modelización teórica de la planta

La modelización teórica, implica la obtención, desde el punto de vista cualitativo, de las ecuaciones físicas para aproximarnos al modelo matemático de la planta. La figura N°2 muestra un modelo resumido de la planta.

La energía que se pone en juego en la planta (Ogata, 1996) a través del calor ( $Q$ ), se puede expresar en forma global e ideal por:

$$Q_{ec} = Q_{aa} + Q_{pcc} \quad (1)$$

donde:  $Q_{ec}$  es el calor entregado por la caldera;  $Q_{aa}$  es el calor absorbido por el agua y  $Q_{pcc}$  es el calor perdido en convectores y radiadores.

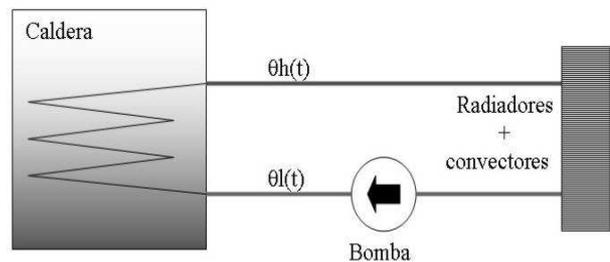


FIGURA N°2: Modelo resumido de la planta.

Utilizando las ecuaciones de calorimetría (Ogata, 1996) y derivando respecto al tiempo obtenemos:

$$\frac{d(Q_{ec})}{dt} = \frac{d(m \cdot c \cdot \theta(t))}{dt} + \frac{d\left(\int g \cdot c \cdot \theta(t) dt\right)}{dt} \quad (2)$$

donde:

$m$ ; es la masa del agua en la caldera

$c$ ; es el calor específico del agua

$g$ ; es el gasto o flujo (masa/tiempo) de agua en el conjunto de los convectores y radiadores

$\theta$ ; diferencia de temperatura del agua ( $\theta_h - \theta_l$ )

$\theta_h$ ; es la temperatura del agua a la salida de la caldera

$\theta_l$ ; es la temperatura del agua a la entrada de la caldera

El primer miembro constituye la potencia entregada por la caldera al agua, la cual se puede expresar por:

$$P_{Cal}(t) = \eta \cdot P_c \cdot \gamma(t) \quad (3)$$

donde:

$\eta$ ; es el rendimiento de la caldera, provocado por la pérdida de potencia en la ineficaz transferencia de energía entre los gases de combustión y el agua.

$P_c$ ; es el poder calorífico del combustible (gas natural) utilizado.

$\gamma$ ; es el caudal de combustible (gas natural) empleado.

Además, considerando el retardo de la transferencia de potencia calorífica entre la caldera y el agua (ya que esta no es instantánea) y el reemplazo de  $\theta(t)$  por la diferencia resulta:

$$\eta \cdot P_c \cdot \gamma(t - t_0) = mc \cdot \frac{d(\theta_h(t))}{dt} - mc \cdot \frac{d(\theta_l(t))}{dt} + g \cdot c \cdot \theta_h(t) - g \cdot c \cdot \theta_l(t) \quad (4)$$

Buscamos eliminar de esta ecuación  $\theta_l(t)$  y su derivada respecto del tiempo, para esto buscamos que relación existe entre la potencia calorífica desprendida por el agua en los radiadores/conectores y la potencia calorífica recibida por el ambiente. La temperatura de este último es el factor fundamental que gobierna la calefacción en dicho sistema. Cuando aumenta la temperatura del ambiente disminuye la transmisión de calor de los radiadores/conectores y viceversa, por tal motivo el rango óptimo de la temperatura del agua a la entrada de los mismos oscila entre 80°C y 95°C (Quadri, 1987). Si consideramos la pared de un radiador o convector, el pasaje de la energía por calor se efectúa teniendo en cuenta los tres mecanismos; conducción,

convección y radiación. Los coeficientes de los mecanismos de transmisión se pueden reagrupar y unificar en uno llamado coeficiente total del calefactor  $k_c$ . La potencia calórica integral transferida por un convector/radiador (Quadri, 1987) para una superficie expuesta A puede expresarse mediante:

$$g \cdot c \cdot \theta h(t) - g \cdot c \cdot \theta l(t) = k_c \cdot A \left( \frac{\theta h(t) + \theta l(t)}{2} - \theta_{amb}(t) \right) \quad (5)$$

Despejamos la temperatura del agua entrante a la caldera  $\theta l(t)$ , obtenemos su derivada respecto del tiempo y se reemplazan ambas ecuaciones en (4) obteniendo:

$$K_p \cdot \gamma(t - t_0) = \tau \cdot \frac{d(\theta h(t) - \theta_{ambiente}(t))}{dt} + (\theta h(t) - \theta_{ambiente}(t)) \quad (6)$$

Donde definimos la constante de la planta ( $K_p$ ) y la constante de tiempo de la misma ( $\tau$ ):

$$K_p = \eta \cdot Pc \cdot \left( \frac{1}{k_c \cdot A} + \frac{1}{2 \cdot g \cdot c} \right) \quad (7) \quad \tau = \frac{m}{g} \quad (8)$$

Aplicamos la transformada de Laplace y despejamos la temperatura del agua a la salida de la caldera ( $\theta h$ ) quedando:

$$\theta h(s) = \frac{K_p}{\tau} \cdot \frac{e^{-t_0 \cdot s}}{\left( s + \frac{1}{\tau} \right)} \cdot \gamma(s) + \theta_{ambiente}(s) \quad (9)$$

Por ser la modalidad de control del tipo on/off, el caudal de combustible se asemeja en el tiempo a una función escalón, cuya transformada de Laplace es:

$$\gamma(s) = \frac{\gamma_{max}}{s} \quad (10)$$

Reemplazando la (10) en la (9) se llega a la expresión de la planta en el dominio de la frecuencia:

$$\theta h(s) = \frac{K_p}{\tau} \frac{e^{-t_0 \cdot s}}{(s + p)} \cdot \frac{\gamma_{max}}{s} + \theta_{ambiente}(s) \quad (11)$$

Representada gráficamente en la Fig. N°3, donde p es el polo de la planta, igual a la inversa de la constante de tiempo ( $\tau$ ),  $K_p$  es la constante de proporcionalidad de la planta y  $T_0$  es el retardo de la planta.

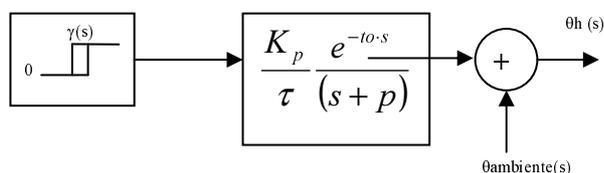


FIGURA N°3: Representación de la planta en plano S.

Podemos antitransformar esta ecuación por medio de fracciones parciales y obtener la temperatura del agua a la salida de la caldera en el dominio del tiempo:

$$\theta h(t) = K_p \cdot \gamma_{max} \cdot (1 - e^{-p \cdot (t - t_0)}) \cdot u(t - t_0) + \theta_{ambiente}(t) \quad (12)$$

En definitiva en este desarrollo encontramos cualitativamente un modelo dinámico de primer orden

para nuestra planta, constituido por un polo, una constante de proporcionalidad y un retardo. Para obtener los valores cuantitativos hay dos opciones, una manera es utilizando las expresiones (7) y (8) lo cual requiere la medición de variables de difícil y ardua obtención, como el coeficiente total del calefactor ( $k_c$ ) y la otra consiste en excitar el sistema con una señal y registrar o medir su comportamiento frente a este estímulo. Por medio de un adquisidor de datos registramos la temperatura del agua a la salida de la caldera y la posición de la electroválvula controladora del gas, tomando diferentes valores de temperatura de referencia. A los datos adquiridos le aplicamos un método estadístico de regresión para ajustar los datos experimentales a los de la expresión teórica (12). La técnica más común para determinar los parámetros anteriores (Marlin, 1994) es aplicando el método de mínimos cuadrados, el cual minimiza la suma del error al cuadrado entre el valor teórico predicho y el medido de todas las muestras, otorgando una aproximación intuitivamente atrayente para encontrar los mejores valores de los parámetros ( $\tau$ ,  $K_p$  y  $t_0$ ). Los valores de dichos parámetros son los tomados como aproximación teórica al modelo dinámico de primer orden considerado para nuestra planta. Estos son:

Promedio  $\tau = 3554,82$  seg; promedio  $K_p = 85903$  °C\*seg/m<sup>3</sup> y promedio  $t_0 = 28$  seg.

### C. Planteo teórico y modelización del control difuso

La planta expuesta modifica la temperatura del ambiente interior, pero el control original on-off sensa la temperatura del agua a la salida de la caldera como señal de ajuste, estableciendo una dependencia indirecta con la temperatura ambiente. Formas de adaptar y optimizar el control existen potencialmente diversas, pero la limitación radica en la no disponibilidad de controlar grupos de radiadores o convectores, ya sea por válvulas by-pass o deflectores de flujo de convección respectivamente, lo que permitiría una adaptación de la temperatura ambiente por cada habitación o grupo de estas. Además el control on-off posee una histéresis entre estados de 5°C, lo que provoca una temperatura del agua promedio de funcionamiento más baja y un ritmo de climatización más lento. Entonces nuestro nuevo control tiene como objetivo que más allá de considerar la temperatura del agua a la salida de la caldera, provocar un ajuste al aporte de energía en base a un promedio de las temperaturas ambientes y disminuir la variación de la temperatura del agua mejorando la entrega energética para una climatización más inmediata.

Dentro de las amplias estrategias de control, el control difuso es una alternativa práctica para una variedad de aplicaciones de control dado que provee las siguientes ventajas (Passino y Yurkovich., 1998):

- Son una forma fácil de codificar y construir controles no lineales.

- Usa información heurística. Incorporar el concepto de grado de incertidumbre o certeza, que integra, la imprecisión en la medición y la subjetividad que caracteriza al control lingüístico.

-Tiene una buena correspondencia a la forma del pensamiento humano sobre una gran clase de problemas matemáticos. Se focaliza sobre un entendimiento intuitivo de cómo controlar mejor el proceso, cargando expresiones cualitativas directamente en el controlador difuso.

-Cuenta con la ventaja que pueden diseñarse aunque no se tenga un modelo matemático de la planta a controlar, gracias a que están basados en reglas, pero implica no poder realizar simulaciones sobre la misma, de tal manera que los ajustes del controlador deben realizarse en línea.

-Los sistemas difusos se pueden ejecutar rápidamente sobre computadoras convencionales, pero hay que tener en cuenta la velocidad de los procesos a controlar y la cantidad de entradas y salidas.

En oposición sus desventajas son:

-No hay actualmente un análisis matemático riguroso que garantice que el uso de un sistema difuso para controlar un sistema, de cómo resultado un sistema estable.

-Es difícil llegar a una función de pertenencia y a una regla confiable.

-Se torna complicado el procesamiento cuando hay muchas funciones de entrada y salida y en procesos de tiempo real.

Como nuestra planta es extremadamente lenta y con pocas entradas/salidas, disponemos al control difuso dentro del lazo cerrado, de forma directa, es decir las salidas del sistema de lógica difusa son las variables que comanda la planta directamente.

La estructura general de un sistema de inferencia difuso esta compuesto por 4 bloques principales (Fig. N°4):

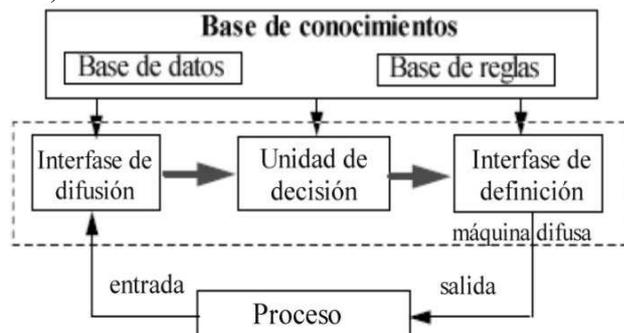


FIGURA N°4 Bloques del control difuso.

*Base de conocimientos;* reglas y parámetros para las funciones de pertenencia.

*Unidad de decisión;* operación de inferencia sobre las reglas almacenadas.

*Interfase de difusión;* transforma los valores concretos de las entradas en grados equivalentes de variables lingüísticas.

*Interfase de definición;* transforma los resultados difusos de la inferencia en valores de salida concretos.

Las señales de entrada usadas son la diferencia de temperatura entre la referencia (temperatura deseada del agua de salida) y la temperatura medida del agua a la salida de la caldera (Tref-Tagua) y la diferencia de temperatura entre la referencia y la ambiente (Tref-

Tamb). En cuanto a la señal de salida es el porcentaje del ciclo de trabajo de la electroválvula de gas natural. Esta señal debe pasar por un modulador por ancho de pulso (PWM), el cual genera el ciclo de onda cuadrada de trabajo. El periodo de referencia de trabajo es de 5 minutos, pudiendo variar en forma continua entre un pulso mínimo de 1 minuto encendido y 4 minutos apagado hasta un máximo de 4 minutos encendidos y 1 minuto apagado, además de permanecer 5 minutos apagados (0%) y 5 minutos encendido (100%). Este salto entre apagado (0%) y pulso mínimo al igual que entre pulso máximo y encendido (100%), se establece para evitar el deterioro de la electroválvula debido a su inercia mecánica y un excesivo desgaste de la misma.

Las señales de entrada a la máquina difusa siguen los siguientes pasos de razonamiento:

1. Difusificación: A todas las variables medidas a la entrada se les atribuye o asigna el grado de pertenencia o valor de membresía, para todos los conjuntos difusos definidos en el universo de discurso. La variable de entrada Tref-Tagua, tiene un universo de discurso fraccionado lingüísticamente, cada uno de estos conjuntos asigna al valor concreto de entrada un valor o grado de certeza entre 0 y 1, que determina la pertenencia o membresía a dicho conjunto difuso.

TABLA N°1: Universo de discurso Tref-Tagua.

Variable de entrada Tref-Tagua	
Conjuntos de pertenencia de temperatura	Rango de valores donde grado pertenencia es ≠0
alta	Tref-Tagua < -2.5°C
ref+	-3°C < Tref-Tagua < -0.74°C
ref	-1.2°C < Tref-Tagua < 0.38°C
ref-	-0.42°C < Tref-Tagua < 1.7°C
media	0.5°C < Tref-Tagua < 3°C
baja	Tref-Tagua > 2°C

El grado o valor de pertenencia se asigna mediante la función de pertenencia o membresía (Passino y Yurkovich., 1998). Hay varias formas para asignar dicho valor, la utilizada aquí es la función de membresía o pertenencia triangular. La figura N°5 muestra la distribución del universo de discurso de Tref-Tagua y las funciones de pertenencia.

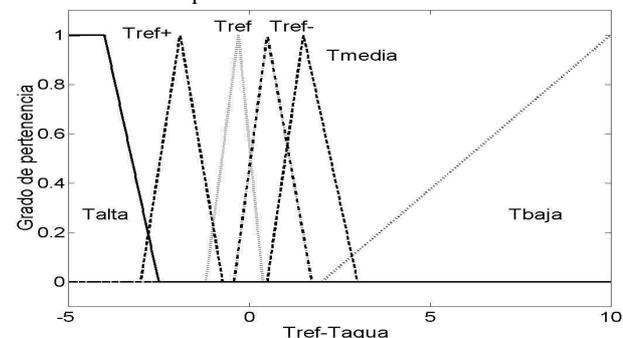


FIGURA N°5: Funciones de pertenencia Tref-Tagua.

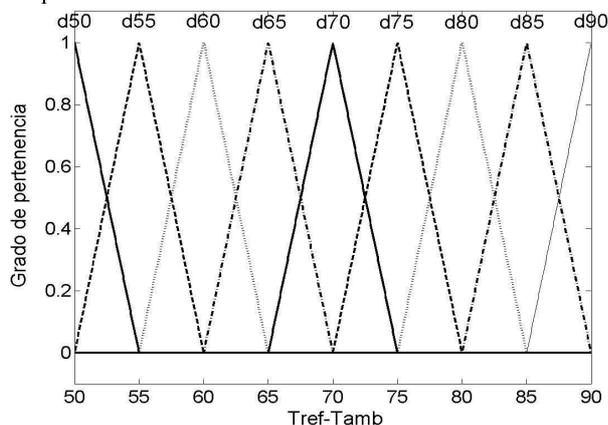
La segunda variable de entrada Tref-Tamb, también tiene su universo de discurso fraccionado y cada uno de estos conjuntos asigna al valor concreto de entrada un

valor o grado de certeza entre 0 y 1. Así se determina la pertenencia o membresía a dicho conjunto difuso.

**TABLA N°2: Universo de discurso Tref-Tamb.**

Variable de entrada Tref-Tamb	
Conjuntos de pertenencia de temperatura	Rango de valores donde grado pertenencia es ≠0
d50	Tref-Tamb < 55°C
d55	50°C < Tref-Tamb < 60°C
d60	55°C < Tref-Tamb < 65°C
d65	60°C < Tref-Tamb < 70°C
d70	65°C < Tref-Tamb < 75°C
d75	70°C < Tref-Tamb < 80°C
d80	75°C < Tref-Tamb < 85°C
d85	80°C < Tref-Tamb < 90°C
d90	Tref-Tamb > 85°C

El grado o valor de pertenencia se asigna mediante la función de pertenencia o membresía, las cuales también son triangulares. La figura N°6 muestra la distribución del universo de discurso de Tref-Tamb y las funciones de pertenencia.



**FIGURA N°6: Funciones de pertenencia Tref-Tagua.**

Se puede apreciar que para ciertos valores de entrada de Tref-agua o de Tref-Tamb, solo un conjunto de membresía tiene un valor de pertenencia ≠0. En cambio para otros valores de las entradas anteriores, se tienen diferentes valores o grados de pertenencia según cual conjunto de membresía se considere.

2. Generación del valor o grado antecedente para cada regla: Las señales de las entradas, se someten a la máquina o unidad de decisión en base a reglas de inferencia. Las reglas de inferencia tienen 2 partes el antecedente o premisa, que en nuestro caso por tener dos entradas tiene la forma (si/if...y/and....), y la consecuencia o conclusión expresada por (entonces/then.....). El conjunto de reglas definirá la lógica del control, siendo algunas de las definidas para el control de la caldera de calefacción:

```

If (Tref-Tagua is Tref) and (Tref-Tamb is d70) then (Salida is bajo) (1)
If (Tref-Tagua is Tref) and (Tref-Tamb is d65) then (Salida is bajo) (1)
If (Tref-Tagua is Tref) and (Tref-Tamb is d60) then (Salida is min) (1)
If (Tref-Tagua is Tref) and (Tref-Tamb is d55) then (Salida is bajo) (1)
If (Tref-Tagua is Tref) and (Tref-Tamb is d50) then (Salida is bajo) (1)
If (Tref-Tagua is Tref+) and (Tref-Tamb is d90) then (Salida is alto) (1)
If (Tref-Tagua is Tref+) and (Tref-Tamb is d85) then (Salida is alto) (1)
    
```

La premisa (si/if.....y/and.....) tienen una conjunción, que equivale a un operador intersección de

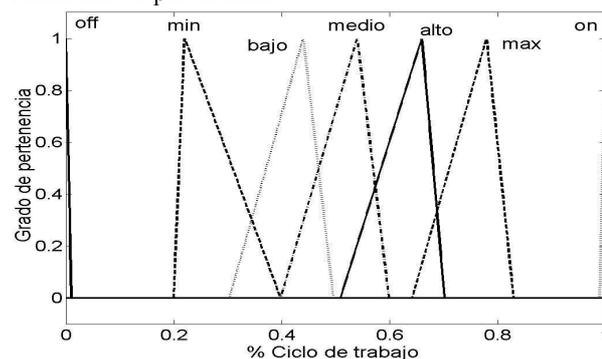
conjuntos difusos, el cual debe satisfacer una serie de axiomas. Existen varios operadores intersección que cumplen dichos axiomas (Kasabov, 1998), siendo el operador mínimo el utilizado por nosotros. Es decir, con los valores o grados de pertenencia o membresía de las respectivas entradas, se resuelve el valor de la premisa (entre 0 y 1) tomando el mínimo de ellos. Esto se lleva a cabo para cada una de las reglas de inferencia.

3. Generación del valor o grado consecuente para cada regla: También las variables de salida tienen un universo de discurso fraccionado lingüísticamente en conjuntos, si a dichos conjuntos se le asigna un valor preciso tenemos un modelo tipo Sugeno (Passino y Yurkovich., 1998), si se le asigna un valor o grado de pertenencia o membresía tenemos un modelo Mandani (existiendo otras variantes). Aplicamos el modelo difuso tipo Mandani (Passino y Yurkovich., 1998) a la variable de salida de nuestro control, el cual da el porcentaje del ciclo de trabajo de la electroválvula de gas natural (% Ctra).

**TABLA N°3: Universo de discurso %Ctra.**

Variable de salida %ciclo trabajo (%Ctra)	
Conjuntos de pertenencia	Rango de valores donde grado pertenencia es ≠0
On	0.99 < % Ctra < 1
Max	0.64 < % Ctra < 0.83
Alto	0.5 < % Ctra < 0.7
Medio	0.4 < % Ctra < 0.6
Bajo	0.3 < % Ctra < 0.5
Min	0.2 < % Ctra < 0.4
Off	0 < % Ctra < 0.01

El grado o valor de pertenencia al igual que en las entradas, se asigna utilizando la función de membresía o pertenencia triangular. La figura N°7 muestra la distribución del universo de discurso de %Ctra y las funciones de pertenencia.



**FIGURA N°7: Funciones de pertenencia %Ctra.**

Para resolver como el valor o grado del antecedente de la inferencia, modifica o influye sobre la función de pertenencia o membresía de salida (consecuencia de la inferencia), utilizamos otra vez el operador mínimo. Esto genera que la forma triangular de la función de pertenencia resulte truncada para el valor o grado del antecedente de la inferencia, obteniendo la forma final de la función de membresía para una inferencia determinada. Los pasos descritos en 2 y 3 se aplican a todas las reglas que conforman la base de conocimiento.

Obteniendo tanta cantidad de funciones de membresía de la variable de salida, como reglas de inferencia.

4. Desdifusificación: Es el proceso de generar valores concretos para la variable de salida. Para esto debemos primero ensamblar o sumar todas las funciones de membresía de la variable de salida, conformando una única función de membresía de salida donde cada salida parcial contribuye con su peso. El efecto de suma nos vincula, como en la lógica booleana, con el operador unión de conjuntos difusos, el cual debe satisfacer una serie de axiomas. Existen varios operadores unión que cumplen dichos axiomas (Kasabov, 1998), siendo el operador máximo el utilizado por nosotros. Es decir, se toma el máximo valor o grado (entre 0 y 1) para cada punto, de entre todas las funciones de membresía parciales de salida, obteniendo la función conjunta de membresía de salida.

Ahora si, alcanzamos la condición para implementar el proceso inverso de desdifusificación, pudiendo optar por varios métodos (Passino y Yurkovich., 1998). Entre ellos se encuentra el del área bisector, el cual busca el valor del porcentaje del ciclo de trabajo, que parte al área que se encuentra debajo de la función conjunta de membresía de salida, en dos sectores derecha e izquierda con la misma área. Obtenemos de esta forma un valor concreto de % del ciclo de trabajo, acorde a los valores concretos de Tref-agua y de Tref-Tamb y a las reglas de conocimiento de la planta.

Todos los pasos anteriores describen el modo de llevar a cabo el nuevo control para la calefacción, bajo reglas de lógica difusa.

#### D. Simulación y comparación

El llegar a concretar las funciones de pertenencia o membresía de las figuras N°5, N°6 y N°7, es un trabajo de búsqueda que se facilita por medio de la simulación, el cual necesita del modelo matemático de la planta, como es nuestro caso. Trasladamos al entorno del software Matlab y Simulink el nuevo control difuso de lazo cerrado, conformado por el modelo de planta, la maquina difusa y un modulador por ancho de pulsos (PWM) el que se encarga de tomar el porcentaje del ciclo de trabajo (variable de salida del controlador difuso) y conformar la onda cuadrada con el periodo adecuado de encendido y apagado que comanda la electroválvula de gas natural. Realizamos simulaciones para diferentes temperaturas ambientes y de referencia, las cuales permitieron sintonizar todas las funciones de membresía. De todas las simulaciones exponemos dos a continuación, una que se realizó con una temperatura de referencia de 80°C y otra de 90°C y con 0°C de temperatura ambiente, según las figuras N°8 y N°9 respectivamente.

Se puede apreciar también como medida comparativa, la simulación del antiguo control de lazo cerrado on-off, conformado por el modelo de planta y un ciclo de histéresis, para las mismas condiciones de temperatura de referencia y ambiente.

### III. CONCLUSIONES

Podemos lograr por medio de este control una mejor aproximación a la temperatura de referencia, teniendo solo una caída de aproximadamente 2°C, en contrapartida de 5°C del antiguo control. Esto proporciona además una transferencia de energía en los calefactores más constante, lo que se traduce en una climatización más rápida del ambiente y un mejor aprovechamiento del combustible.

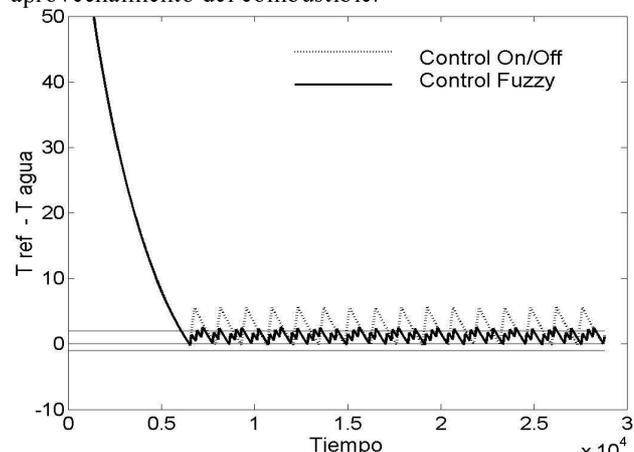


FIGURA N°8: Comparación con Tref=90°C

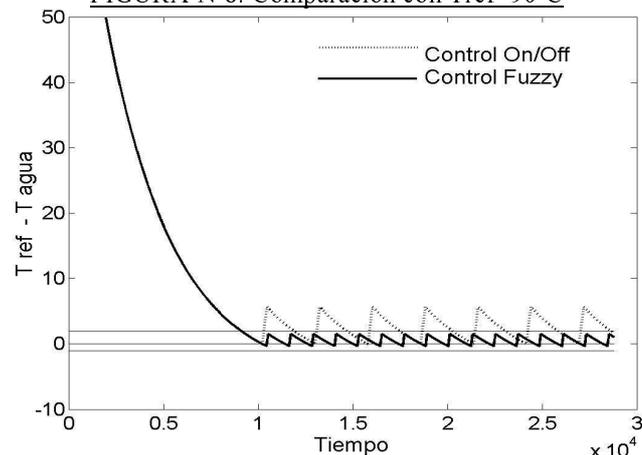


FIGURA N°9: Comparación con Tref=80°C

### REFERENCIAS

- Giacomi A., M.D. Dorado, C. Tapia "Balance térmico, sistemas de calefacción y aire acondicionado", Librería Técnica, Ciudad de Buenos Aires (1973).
- Ogata K., "Ingeniería de control moderna", Prentice Hall, Méjico (1996).
- Quadri N.P., "Instalaciones de aire acondicionado y calefacción", Alsina, Ciudad de Buenos Aires (1987).
- Marlin T., "Process control", Mac Graw-Hill, New York (1994).
- Passino K., y Yurkovich S., "Fuzzy Control", Addison-Wesley, California (1998).
- Kasabov N.K., "Foundations of neural networks, fuzzy systems and knowledge engineering", Bradford book, London (1998).