

***INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL***

***CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN  
TECNOLÓGICA***

“Sistema de control de temperatura basado en lógica difusa para la mezcla de agua”

**TESIS**

Que para obtener el Grado de:

**Maestro en Tecnología Avanzada**

Presenta:

**Ing. Serrano Pérez Edgar**

Directores de Tesis:

Dr. Martínez Romero Gustavo

Dr. Rubio Ávila José de Jesús

Director

Co-Director



SIP-14-BIS

# INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

## SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO

### ACTA DE REVISIÓN DE TESIS

En la Ciudad de México siendo las 16:00 horas del día 11 del mes de Enero del 2013 se reunieron los miembros de la Comisión Revisora de la Tesis, designada por el Colegio de Profesores de Estudios de Posgrado e Investigación de CIITEC para examinar la tesis titulada:  
Sistema de control de temperatura basado en lógica difusa para la mezcla de agua

Presentada por el alumno:

Serrano  
Apellido paterno

Pérez  
Apellido materno

Edgar  
Nombre(s)

Con registro: A 1 1 0 1 4 6

aspirante de:

Maestría en Tecnología Avanzada

Después de intercambiar opiniones los miembros de la Comisión manifestaron **APROBAR LA TESIS**, en virtud de que satisface los requisitos señalados por las disposiciones reglamentarias vigentes.

### LA COMISIÓN REVISORA

Directores de tesis

Dr. Gustavo Martínez-Romero

Dr. José de Jesús Rubio Ávila

Dr. Fernando Martínez Piñón

Dra. Irina Victorovna Lijanov

M. en C. Agustín Cruz Contreras

PRESIDENTE DEL COLEGIO DE PROFESORES

Dr. David Jaramillo Viguera



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL  
CENTRO DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO  
DIRECCIÓN

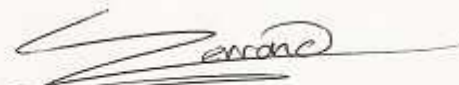


**INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL**  
**SECRETARÍA DE INVESTIGACIÓN Y POSGRADO**

*CARTA CESIÓN DE DERECHOS*

En la Ciudad de México, D.F. el día 14 del mes de Enero del año 2013, el (la) que suscribe Serrano Pérez Edgar alumno(a) del Programa de Maestría en Tecnología Avanzada, con número de registro A110146, adscrito(a) al **CENTRO DE INVESTIGACIÓN E INNOVACIÓN TECNOLÓGICA**, manifiesto(a) que es el (la) autor(a) intelectual del presente trabajo de Tesis bajo la dirección del (de la, de los) **Dr. Gustavo Martínez Romero y Dr. Rubio Ávila José de Jesús** y cede los derechos del trabajo titulado "Diseño de un sistema de control de temperatura para la mezcla de agua", al Instituto Politécnico Nacional para su difusión, con fines académicos y de investigación.

Los usuarios de la información no deben reproducir el contenido textual, gráficas o datos del trabajo sin el permiso expreso del (de la) autor(a) y/o director(es) del trabajo. Este puede ser obtenido escribiendo a las siguientes direcciones kolben88@yahoo.de. Si el permiso se otorga, el usuario deberá dar el agradecimiento correspondiente y citar la fuente del mismo.

  
Ing. Serrano Pérez Edgar  
Nombre y firma del alumno(a)

# Resumen

Los sistemas de mezclado del agua son utilizados en una gran variedad de aplicaciones como lo son para el área doméstica, de riego, tratamiento de aguas contaminadas, hidrotermales y procesos químicos. La mayoría de estos tipos de sistemas son controlados de manera manual mediante la operación de válvulas de control que son manipuladas de acuerdo a la experiencia y habilidad del usuario.

En este trabajo se presenta un sistema de control basado en lógica difusa, que regula la temperatura y flujo de salida de un sistema de mezclado de agua, mediante dos válvulas de control, una para la entrada de agua caliente y otra para la entrada de agua fría. La acción de control se realiza a partir de las variables de entrada: temperatura y flujo respectivos, de cada entrada de agua. A partir de estos valores, se calcula el error y se fusifica para cada variable. El valor fusificado es usado para calcular el grado de membresía de cada una de las acciones de control. Las funciones difusas correspondientes a las acciones de control son: cerrar rápido, cerrar lento, mantener, abrir rápido, abrir lento o mantener.

La acción de control respectiva de cada válvula, es entonces defusificada, para obtener el valor de corrección, mismo que es aplicado a la válvula respectiva. El proceso es iterativo y se detiene hasta lograr la temperatura deseada.

Se presentan resultados de simulación del proceso de mezcla de agua en Matlab y en LabView. Se comparan los resultados del controlador PID y el controlador con lógica difusa. Finalmente se desarrolla un sistema mezclador en C y se muestran los resultados obtenidos.

# Abstract

Water mixing systems are used in a wide variety of applications such as home cleaning areas, irrigation, waste water treatment, hydrothermal and chemical processes. Most of these types of systems are controlled manually by operation of control valves which are manipulated according to the user's experience and skill.

In this work a control system based on fuzzy logic which regulates temperature and outflow of a water mixing system is presented, using two control valves, one for hot water inlet and other for cold water inlet. The control action is performed using input variables: temperature and flow respectively for each water inlet. From these values, error is calculated and then fuzzified for each variable. The fuzzified value is then used to calculate the membership value of each control action function. The fuzzy functions corresponding to the control actions are: open fast, open slow, hold, close fast, close or hold.

The respective control action for each control valve is then defuzzified, in order to get correction's value, the same that is applied for each respective valve. The process is iterative and stops when desired temperature is achieved.

Simulation results of the mixing water process developed in Matlab and Labview are shown. The PID and fuzzy logic controller's results are compared. Finally a mixing system on C is developed and results are shown.

## **Capítulo 1      INTRODUCCIÓN      1**

<b>1.1</b>	<b>Presentación del Problema .....</b>	<b>1</b>
1.1.1	Sistemas dinámicos multivariados .....	2
1.1.2	Control Multivariable.....	3
1.1.3	Sistema de Control multivariable de mezclado .....	3
<b>1.2</b>	<b>Definición del problema de la mezcla de agua.....</b>	<b>4</b>
<b>1.3</b>	<b>Objetivo General .....</b>	<b>4</b>
<b>1.4</b>	<b>Objetivos Particulares.....</b>	<b>5</b>
<b>1.5</b>	<b>Alcances del proyecto.....</b>	<b>5</b>
<b>1.6</b>	<b>Motivación.....</b>	<b>5</b>
<b>1.7</b>	<b>Importancia de la solución del problema.....</b>	<b>6</b>
<b>1.8</b>	<b>Controlador proporcional-integral-derivativo (PID).....</b>	<b>6</b>
<b>1.8</b>	<b>Lógica difusa .....</b>	<b>7</b>
1.9.1	Control Difuso.....	8
<b>1.10</b>	<b>Nueva Propuesta.....</b>	<b>8</b>
<b>1.11</b>	<b>Resumen .....</b>	<b>9</b>

## **Capítulo 2      MEZCLA TÉRMICA DEL AGUA      10**

<b>2.1</b>	<b>El agua.....</b>	<b>10</b>
2.1.1	Propiedades del agua .....	11
<b>2.2</b>	<b>Efecto de la temperatura sobre la piel al estar en contacto con agua caliente .....</b>	<b>12</b>
<b>2.3</b>	<b>Temperatura de confort en el ser humano .....</b>	<b>13</b>
<b>2.4</b>	<b>Mezclado .....</b>	<b>14</b>
2.4.1	Mecanismo de Transporte Molecular .....	14
2.4.2	Fluidos newtonianos.....	15
2.4.3	Flujo laminar .....	19
2.4.4	Flujo turbulento .....	19
<b>2.5</b>	<b>Transferencia de calor y de masa en flujo turbulento .....</b>	<b>20</b>
2.5.1	Mezclado de Agua .....	20

<b>2.6</b>	<b>Sistema de mezclado de agua propuesto .....</b>	<b>22</b>
<b>2.7</b>	<b>Lógica difusa .....</b>	<b>23</b>
<b>2.8</b>	<b>Control Difuso .....</b>	<b>25</b>
2.8.1	Revisión Histórica .....	25
2.8.2	Fusificación .....	25
2.8.3	Conjuntos difusos .....	26
2.8.4	Compleitud de un Conjunto Difuso .....	26
2.8.5	Variables lingüísticas.....	28
2.8.6	Funciones de membresía .....	28
2.8.7	Reglas de inferencia difusa .....	29
2.8.8	Defusificación, método de la media ponderada .....	29
2.8.9	Estructura general de un Controlador Difuso .....	30
2.8.10	Estructura del controlador Difuso Propuesto .....	31
<b>2.9</b>	<b>Ventajas del control difuso .....</b>	<b>32</b>
<b>2.10</b>	<b>Aplicaciones del Control Difuso.....</b>	<b>32</b>
<b>2.11</b>	<b>Modelo matemático .....</b>	<b>34</b>
<b>2.12</b>	<b>Resumen .....</b>	<b>37</b>

## **Capítulo 3** ***DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO*** **38**

<b>3.1</b>	<b>Introducción.....</b>	<b>38</b>
<b>3.2</b>	<b>Rango de operación del Controlador .....</b>	<b>39</b>
<b>3.3</b>	<b>Variables de entrada.....</b>	<b>39</b>
<b>3.4</b>	<b>Variables de Salida .....</b>	<b>42</b>
<b>3.5</b>	<b>Reglas de Control .....</b>	<b>44</b>
<b>3.6</b>	<b>Método de defusificación .....</b>	<b>45</b>
<b>3.7</b>	<b>Ejemplo 1.....</b>	<b>45</b>
<b>3.8</b>	<b>Ejemplo 2.....</b>	<b>54</b>
<b>3.10</b>	<b>Resumen .....</b>	<b>66</b>

<b>4.1</b>	<b>Simulación del sistema de mezclado de agua en Labview .....</b>	<b>67</b>
<b>4.2</b>	<b>Simulación por Elemento Finito Fluent–Ansys.....</b>	<b>71</b>
<b>4.3</b>	<b>Control PID.....</b>	<b>74</b>
4.3.1	Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador PID .....	77
4.3.2	Respuesta de flujo en la salida del sistema mezclador con controlador PID .....	78
<b>4.4</b>	<b>Control Difuso .....</b>	<b>79</b>
4.4.1	Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso .....	80
4.4.2	Respuesta de flujo en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso .....	80
<b>4.5</b>	<b>Comparación entre controlador Difuso y PID. ....</b>	<b>81</b>
4.5.1	Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador difuso y controlador PID.....	82
4.5.2	Respuesta de flujo en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso y controlador PID.....	83
4.5.3	Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso y controlador PID con variaciones en la temperatura de referencia. ....	84
<b>4.6</b>	<b>Simulación del sistema de mezclado de agua .....</b>	<b>88</b>
<b>4.7</b>	<b>Comparación entre el mezclador difuso y el programa que calculador de flujos requeridos. ....</b>	<b>91</b>
<b>4.8</b>	<b>Resumen .....</b>	<b>93</b>
<b>Conclusiones .....</b>		<b>93</b>
<b>Referencias .....</b>		<b>95</b>



## Índice de Figuras

Figura 1. La estructura atómica de la molécula de agua consta de dos átomos de hidrógeno (H) unidos a un átomo de oxígeno (O).	10
Figura 2.- Temperatura de confort en el ser humano	13
Figura 3. Comportamiento de fluidos bajo el efecto de una acción cortante.	16
Figura 4. Modelo simple de un líquido es el diámetro molecular; $d$ es la distancia libre entre moléculas; $A$ es un "agujero" entre moléculas.	17
Figura 5.- Modelo físico del sistema de mezclado propuesto.	22
Figura 6.- Grado de completitud de un conjunto difuso	26
Figura 7.- Formas de las funciones de membresía (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana, (d) sigmoidal	28
Figura 8.- Estructura de un Controlador Difuso	30
Figura 9. Estructura del Controlador Difuso Propuesto	31
Figura 10.- Descripción sistemática del sistema de mezclado.	35
Figura 11.-Fusificación de la temperatura de confort humano	40
Figura 12.- Funciones de membresía para la variable ErrorTemperatura	41
Figura 13.- Funciones de membresía para la variable ErrorFlujo	42
Figura 14.- Funciones de membresía de las variables de salida ValFria	43
Figura 15.- Funciones de membresía de las variables de salida Valcal	43
Figura 16.- Funciones de membresía de la variable Errortemperatura Ej.1	45
Figura 17.- Funciones de membresía de la variable Errorflujo Ej.1	46
Figura 18.- Defusificación de la variable de salida Vfria Ej.1	48
Figura 19.- Defusificación de la variable de salida Vcal Ej.1	49

Figura 20.- Funciones de membresía de la variable temperatura Ej.1	50
Figura 21.- Funciones de membresía de la variable flujo Ej.1	51
Figura 22.- Defusificación de la variable de salida Vfria Ej.1	53
Figura 23.- Defusificación de la variable de salida Vcal Ej.1	53
Figura 24.- Funciones de membresía de la variable temperatura Ej.2	55
Figura 25.- Funciones de membresía de la variable flujo Ej.2	55
Figura 26.- Defusificación de la variable de salida Vfria Ej.2	57
Figura 27.- Defusificación de la variable de salida Vcal Ej.2	58
Figura 28.- Funciones de membresía de la variable temperatura Ej.2	59
Figura 29.- Funciones de membresía de la variable flujo Ej.2	59
Figura 30.- Defusificación de la variable de salida Vfria Ej.2	61
Figura 31.- Defusificación de la variable de salida Vcal Ej.2	61
Figura 32.- Diagrama de bloques de la ecuación de temperatura en Labview	68
Figura 33.- Interface de simulación para el sistema de mezclado de agua	69
Figura 34. Simulación de la respuesta ante una perturbación de 10 °C	70
Figura 35. Simulación de la respuesta del sistema ante una perturbación	70
Figura 36. Configuración tipo T para el mezclado en el sistema de tuberías propuesto.	71
Figura 37: Simulación por elemento finito del sistema propuesto	72
Figura 38.- Velocidad del flujo en el sistema	73
Figura 39. Diagrama de simulación del sistema de mezclado con controlador PID	76
Figura 40.- Respuesta de la temperatura de salida con control PID	77
Figura 41.- Respuesta de flujo en la salida con control PID	78
Figura 42. Diagrama de simulación del sistema de mezclado con controlador difuso	79

Figura 43.- Respuesta de la temperatura de salida con el controlador difuso	80
Figura 44.- Respuesta de flujo de salida con controlador difuso	81
Figura 45. Figura 45. Diagrama de comparación entre controlador tipo PID y el controlador Difuso.	82
Figura 46.- Comparativa entre controlador PID y controlador difuso	82
Figura 47.- Comparativa entre un controlador PID y el controlador difuso en flujo	83
Figura 48.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular la temperatura de salida ante cambios en la referencia de temperatura.	84
Figura 49.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular el flujo de salida ante cambios en la referencia de temperatura.	85
Figura 50.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular la temperatura de salida ante cambios en la referencia de de flujo.	86
Figura 51.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular el flujo de salida ante cambios en la referencia de de flujo.	86
Figura 52.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular la temperatura de salida ante cambios en la referencia de temperatura y referencia de flujo.	87
Figura 53.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular el flujo de salida ante cambios en la referencia de temperatura y referencia de flujo.	88
Figura 54.- Programa que calcula el porcentaje de flujo requerido para mezclar agua	90

## Índice de Tablas

Tabla 1. Variables del sistema de mezclado de agua	2
Tabla 2.- Temperatura y tiempo de exposición para causar daño en la piel por contacto con agua caliente.	12
Tabla 3.- Propiedades de transporte de agua	18
Tabla 4.- Descripción de las variables de entrada al controlador difuso	39
Tabla 5. Base de reglas de inferencia difusa	44
Tabla 6. Base de reglas de inferencia difusa Ej.1	47
Tabla 7. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.1	47
Tabla 8. Base de reglas de inferencia difusa Ej.1	52
Tabla 9. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.1	52
Tabla 10. Aplicación de la Base de Reglas del Sistema de Control Difuso Ej.2	56
Tabla 11. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.2	56
Tabla 12. Aplicación de la Base de Reglas del Sistema de Control Difuso Ej.2	60
Tabla 13. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.2	60
Tabla 14.- Parámetro de la simulación por elemento finito	72
Tabla 15.- Cálculo de flujo requerido para obtener una temperatura y un flujo determinados	90
Tabla 16. Comparación entre el mezclado difuso y el programa que calcula los flujos requeridos para obtener temperatura y flujo deseados	92

# Capítulo 1

# INTRODUCCIÓN

## 1.1 Presentación del Problema

Generalmente en los sistemas de mezclado de agua, el flujo y la temperatura de salida se controlan mediante el ajuste manual de válvulas de control, regulan el ingreso de caudal de agua fría y agua caliente a un sistema de tuberías, donde a la salida del sistema de mezclado se obtiene un flujo y una temperatura determinada.

El flujo y la temperatura de salida del sistema de mezclado son originados por el proceso de transferencia de calor y masa que se llevan a cabo del sistema de tuberías. Mediante el proceso de intercambio de calor por convección que ocurre dentro del sistema de tuberías, la temperatura de salida del sistema está en función tanto de la temperatura de agua fría y agua caliente, como de flujo frío y flujo caliente que ingresan al sistema.

### 1.1.1 Sistemas dinámicos multivariantes

En los sistemas de mezclado de agua residenciales se tienen 4 entradas (2 de Flujo y 2 de Temperatura) y 2 salidas (1 de flujo y 1 de temperatura). Se desea controlar tanto la temperatura y el flujo de salida de la mezcla de agua. Esto se logra a través de la manipulación de válvulas de control que regulan el caudal de entrada de flujo y flujo caliente. Considerando aspectos ideales tanto para los aspectos de medición y de control, por una parte se considera que la medición de temperatura se realiza de manera continua y sin perturbaciones, y por otra parte se considera que los elementos de control presentan un comportamiento lineal sin perturbaciones, se presenta la descripción de las variables del sistema de mezclado en la tabla 1.

<b>Variables a controlar</b>	<b>Elementos de control</b>	<b>Perturbaciones</b>
<ul style="list-style-type: none"><li>• <b>Temperatura de Salida</b></li><li>• <b>Flujo de Salida</b></li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Válvula del agua caliente</li><li>• Válvula del agua fría</li></ul>	<ul style="list-style-type: none"><li>• Temperatura del flujo de agua fría</li><li>• Temperatura del flujo de agua caliente</li><li>• Flujo de entrada del agua fría</li><li>• Flujo de entrada del agua caliente.</li></ul>

Tabla 1. Variables del sistema de mezclado de agua

### 1.1.2 Control Multivariable

Un sistema de control multivariable (MIMO<sup>1</sup>), permite alcanzar el objetivo de mantener un conjunto de variables en un valor deseado a diferencia del control de sistemas (SISO<sup>2</sup>), que solo permite controlar una variable al tiempo. El sistema de mezclado de agua caliente y agua fría es un sistema MIMO, que cuenta con 4 entradas (2 de flujo y 2 de temperatura) y 2 salidas (1 flujo y 1 de temperatura).

Las variaciones de flujo y temperatura que están presentes en las redes de distribución de agua caliente y agua fría, son producto de perturbaciones externas al sistema de mezclado, como pueden ser caídas de presión y variaciones de temperatura, generadas por los sistemas de calentamiento.

Una ventaja del sistema de control realimentado, es que el uso de la realimentación, vuelve a la respuesta del sistema, relativamente insensible a las perturbaciones externas y a las variaciones internas en los parámetros del sistema.

### 1.1.3 Sistema de Control multivariable de mezclado

El comportamiento de un sistema dinámico se encuentra condicionado por las acciones que se ejerzan sobre el mismo. Esas acciones pueden ser ejercidas como acciones deseadas, a través de variables manipuladas (válvulas, interruptores, relevadores, potenciómetros, calefactores, ventiladores, etc.) o a través de variables no manipuladas directamente, generalmente llamadas perturbaciones (cambios de carga, masa ó cambios de concentración, etc.). Los efectos de tales acciones se pueden ver reflejados en una o más variables del sistema (temperaturas, niveles, presiones, velocidad, concentraciones,

---

<sup>1</sup>MIMO - De la sigla en inglés Multiple Input Multiple Output – Multiple entrada Multiple salida

<sup>2</sup>SISO- De la sigla en inglés Single Input Single Output – Una entrada una salida

posición), que bajo ciertas condiciones, se desea mantener en un valor determinado (variables controladas).

La característica principal de controlar un sistema de mezclado es el interferir, influenciar, regular ó modificar el mismo. La función de control es introducida por una organización de elementos (incluyendo personas en el control manual) que, cuando operan juntos se llama sistema de control. Dependiendo si el cuerpo del ser humano está físicamente implicado en el sistema de control, se divide en control manual y en control automático. Debido a su eficiencia, precisión y confiabilidad, el control automático es ampliamente utilizado en el control de procesos. En un sistema automático de control, una máquina ha reemplazado al ser humano. Como una regla general, los sistemas de control de alta precisión y alta velocidad son automáticos.<sup>3</sup>

## 1.2 Definición del problema de la mezcla de agua

Dados dos flujos de agua  $F_1$  y  $F_2$  con temperaturas  $T_1$  y  $T_2$ , obtener un tercer flujo  $F_m$  con temperatura objetivo  $T_m$ , donde  $T_1 \leq T_m \leq T_2$ ,  $T_1 < T_2$  y  $F_m = a \cdot F_1 + b \cdot F_2$ .

Donde:

$a$  = Porcentaje de flujo de agua  $F_1$

$b$  = Porcentaje de flujo de agua  $F_2$

## 1.3 Objetivo General

Resolver el problema de la mezcla de agua

---

<sup>3</sup> Control Systems Theory, Olle L. Elgerd pág 3.



## 1.4 Objetivos Particulares

- 1) Desarrollar un método, usando lógica difusa para el problema de la mezcla de agua
- 2) Desarrollar un algoritmo de solución al problema de la mezcla de agua
- 3) Desarrollar un programa que implemente el algoritmo para el programa de la mezcla de la mezcla de agua
- 4) Desarrollar un simulador del proceso de la mezcla de agua
- 5) Simular el comportamiento del sistema controlado por el sistema de control difuso.

## 1.5 Alcances del proyecto

Como alcances del proyecto se tiene el desarrollo de un método, un algoritmo y un programa que resuelva el problema de la mezcla de agua. La implementación física no se llevará a cabo en el presente proyecto, los fundamentos teóricos de la teoría de los conjuntos difusos son complejos y se ha determinado dedicar mayor tiempo al estudio de los aspectos teóricos de diseño, para diseñar un controlador que regule la planta con una buena respuesta transitoria, es decir, que sea rápido y no presente oscilaciones.

La salida del sistema de control difuso debe proporcionar los porcentajes necesarios para conseguir una temperatura de salida objetivo, por lo que el problema de posicionamiento de la válvula no se aborda en el presente proyecto y se considera que la válvula opera linealmente de estar completamente cerrada a estar completamente abierta.

## 1.6 Motivación

El control de temperatura y flujo residencial generalmente se lleva a cabo mediante la regulación la regulación manual de los elementos de control (válvulas).

El hecho de que en la actualidad este tipo de sistemas de mezclado siga operando de manera manual, brinda una oportunidad para el desarrollo de un sistema de control automático que pueda contribuir a operar el sistema de mezclado de manera segura y eficiente. De esta manera un sistema de control automático permite sustituir a un operador, dado que puede realizar operaciones repetitivas de control con un mejor rendimiento y desempeño.

## 1.7 Importancia de la solución del problema

La aplicación del sistema de control de temperatura no se limita al uso residencial ya que puede extenderse a sistemas de riego, hidroterapia, sistemas industriales de transferencia de calor y sistemas de tratamiento de aguas contaminadas.

## 1.8 Controlador proporcional-integral-derivativo (PID)

El controlador PID es la estrategia de control más común para la regulación de sistemas industriales. El controlador PID consiste de 3 coeficientes básicos, la ganancia proporcional, integral y derivativa. La ecuación descriptiva es la siguiente:

$$m(t) = \bar{m} + K_c e(t) + \frac{K_c}{\tau_i} \int e(t) dt + K_c \tau_D \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

Donde  $\tau_D$  = rapidez de variación en minutos.

Por lo tanto, el controlador PID se tiene tres parámetros,  $K_c$  o PB,  $\tau_i$  y  $\tau_D$  que se deben ajustar para obtener un control satisfactorio. Los controladores PID se utilizan en procesos donde las constantes de tiempo son grandes. La constante de tiempo que tarda el sistema en

alcanzar el 63.2% de su valor final, representa la velocidad de respuesta sistema. Si la constante de tiempo es pequeña implica que el sistema es rápido y viceversa, si la constante de tiempo es grande el sistema es lento.

La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, lo que limita el rango de procesos que se pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden ser estabilizadas con ningún miembro de la familia PID).

Los controladores PID son suficientes para resolver el problema de control de muchas aplicaciones en la industria, particularmente cuando la dinámica del proceso lo permite y los requerimientos de desempeño son modestos (generalmente limitados a especificaciones del comportamiento del error en estado estacionario y una rápida respuesta a cambios en la señal de referencia).

## 1.8 Lógica difusa

La Lógica difusa es un sistema matemático que modela funciones no lineales, que convierte unas entradas en salidas acordes con los planteamientos lógicos que usan el razonamiento aproximado. En ella se permite que sean definidos los valores intermedios entre las evaluaciones convencionales como: verdadero ó falso, sí ó no, alto ó bajo, etc. Nociones como *más alto* o *muy rápido* pueden ser formuladas matemáticamente y procesadas por computadoras. Las aplicaciones van desde el control de complejos procesos industriales, hasta el diseño de dispositivos artificiales de deducción automática, pasando por la construcción de artefactos electrónicos de uso doméstico y de entretenimiento, así como también de sistemas de diagnóstico.

### 1.9.1 Control Difuso

El control difuso proporciona una metodología formal para representar, manipular y aplicar el conocimiento heurístico de un ser humano acerca de cómo controlar un sistema<sup>4</sup>.

El desarrollo del control difuso tiene su origen en los sistemas basados en reglas para la toma de decisiones y en la lógica difusa para la evaluación de ellas.

Los controladores difusos, al igual que otros, toman los valores de las variables de entrada, realizan algún procedimiento con ellas, deciden como modificar las variables de salida y lo realizan, afectando estas últimas a la planta.

Un controlador difuso proporciona un método conveniente para la construcción de los controladores no lineales a través de la utilización de la información heurística, esta información se obtiene a partir conocimiento de la dinámica del sistema.

### 1.10 Nueva Propuesta

Se propone diseñar un sistema de control difuso que permita regularlas variables de salida (temperatura mezclar el flujo de agua caliente y agua fría) de un sistema mezclador de agua.

Con este tipo de controlador se espera que las oscilaciones a la salida del sistema se reduzcan de manera considerable, en comparación con un sistema de control clásico en cual cualquiera de sus combinaciones P, PI ó PID. Es deseable que con el controlador Difuso la velocidad de respuesta del sistema sea mayor que la respuesta con un controlador clásico tipo PID.

---

<sup>4</sup>Fuzzy Control Kevin M. Passino, Yurkovich, p 10.

## 1.11 Resumen

En este capítulo se ha presentado una introducción al problema que se desea resolver. Por una parte se presentó una introducción al consumo de agua residencial, lo que permite tener un panorama más amplio de la magnitud del problema y la importancia que tiene el manejo de fluidos en la vida diaria. Se ha puesto un especial énfasis en el agua por ser el líquido más importante para los seres humanos.

Se presenta una breve introducción a los sistemas de control automático como una alternativa para resolver el problema. Dentro de los sistemas de control que se presentan como posibles soluciones al problema de control se encuentran los sistemas de control clásico, donde el control PID es su máximo representante, sin embargo con las técnicas de control inteligente como lo es el control Difuso se plantea resolver el problema de una manera más eficiente y práctica.

## Capítulo 2

# MEZCLA TÉRMICA DEL AGUA

### 2.1 El agua

El agua es un compuesto químico y su fórmula química es  $H_2O$ . El agua tiene una estructura molecular muy simple. Esta estructura consta de dos átomos de hidrógeno unidos a un átomo de oxígeno como puede observarse en la figura 1.

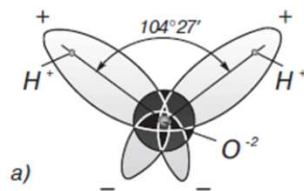


Figura 1. La estructura atómica de la molécula de agua consta de dos átomos de hidrógeno (H) unidos a un átomo de oxígeno (O).

La manera única en la que los átomos de hidrógeno están unidos al átomo de oxígeno, hace que un lado de la molécula que tenga una carga negativa y la zona en la dirección opuesta tenga una carga positiva. La polaridad resultante de la carga hace que las moléculas de agua se atraigan entre sí formando enlaces tipo puentes de hidrógeno.

En el otro lado de la molécula existe una carga negativa. Esta polaridad molecular hace que el agua sea un poderoso disolvente y es responsable de su fuerte tensión superficial.

### 2.1.1 Propiedades del agua

El agua tiene un alto calor específico. El calor específico es la cantidad de energía necesaria para cambiar la temperatura de una sustancia. Debido a que el agua tiene un alto calor específico, puede absorber grandes cantidades de energía térmica antes de que empiece a emitir calor, además significa que el agua desprende energía calorífica lentamente cuando su entorno provoca que se enfríe.

El agua conduce el calor más fácilmente que cualquier líquido, excepto el mercurio. Este hecho hace que grandes masas de agua líquida como lagos y océanos tienen esencialmente un perfil vertical de temperatura uniforme. Tiene dos propiedades únicas: la cohesión y adhesión. Cohesión se refiere al hecho de que el agua se adhiere a sí mismo muy fácilmente. La adhesión significa que el agua también se adhiere muy bien a otras cosas, y por eso se esparce en una capa fina sobre ciertas superficies, como el vidrio.

El agua también tiene un alto nivel de tensión superficial. Esto significa que las moléculas sobre la superficie del agua no están rodeadas por moléculas similares en todos los lados, de modo que están siendo extraídos únicamente por la cohesión de otras moléculas en el

interior. Las sustancias que se disuelven en agua son hidrófilas. Esto significa que son tan fuertes o más fuertes que las fuerzas de cohesión del agua.

La presencia de estos minerales es la diferencia entre el agua dura y agua blanda. El agua dura por lo general contiene una gran cantidad de calcio y magnesio, pero también puede contener metales. Esto puede causar depósitos de calcio en las tuberías, calentadores de agua y grifos.

## 2.2 Efecto de la temperatura sobre la piel al estar en contacto con agua caliente

Moritz y Henriques [40] de la Escuela de Medicina de Harvard estudiaron el tiempo y temperatura necesaria para producir quemaduras de primer y segundo grado en el cuerpo humano. Los resultados se observan en la tabla 2.

<b>Temperatura</b>	<b>Primer Grado</b>	<b>Segundo Grado</b>
°C	Daño no reversible	Lesión Total
<b>44</b>	4.5 Horas	5 Horas
<b>45</b>	2.0 Horas	3 Horas
<b>47</b>	20 Minutos	45 Minutos
<b>48</b>	15 Minutos	20 Minutos
<b>49</b>	8 Minutos	10 Minutos
<b>51</b>	2 Minutos	4.2 Minutos
<b>52</b>	45 Segundos	1.5 Minutos
<b>53</b>	30 Segundos	60 Segundos
<b>55</b>	17 Segundos	30 Segundos
<b>60</b>	3 Segundos	5 Segundos
<b>66</b>	-	2 Segundos

Tabla 2.- Temperatura y tiempo de exposición para causar daño en la piel por contacto con agua caliente.



En el ser humano, además del riesgo por quemaduras, una reacción brusca del cuerpo humano al querer alejarse de la fuente de calor puede provocar una caída o un resbalón de serias consecuencias [41]. De acuerdo con el M.D. Paul Taheri, Director Médico de Centro de Traumatología y Quemaduras de la Universidad de Michigan, el tiempo de exposición para cada temperatura se puede reducir a la mitad para niños y adultos mayores porque la piel es más delgada y más sensible que la de los adultos. Además, son incapaces de actuar tan rápidamente como lo hacen los adultos dada su corta edad o sus limitaciones físicas [42].

### 2.3 Temperatura de confort en el ser humano

Vaughn Bradshaw [44] presenta un estudio de la sensación que provoca la temperatura en el confort del ser humano el cual se puede apreciar en la figura 2.

Temperatura		Sensación	Confort
39		Muy caliente	Muy inconfortable
35		Caliente	
32		Tibia	
28		Ligeramente Tibia	Inconfortable
25		Neutral	<b>Confortable</b>
22		Ligeramente Fresco	
18		Fresco	Ligeramente Inconfortable
15		Frío	
12		Muy Frío	Inconfortable

Figura 2.- Temperatura de confort en el ser humano

## 2.4 Mezclado

El término mezcla ó mezclado, se aplica a una gran variedad de operaciones que difieren ampliamente en el grado de homogeneidad del material «mezclado».

El éxito de muchas operaciones industriales depende de la eficaz agitación y mezcla de fluidos. Aunque con frecuencia tienden a confundirse, agitación y mezcla no son sinónimas.

La mezcla es una distribución al azar de dos o más fases inicialmente separadas. Un único material homogéneo, tal como un tanque con agua fría, puede ser agitado pero en cambio, no puede mezclarse mientras no se le adicione otro material, tal como una cierta cantidad de agua caliente o algún sólido pulverulento.

### 2.4.1 Mecanismo de Transporte Molecular

El transporte molecular de masa, calor y cantidad de movimiento puede tener lugar en un sólido, en un líquido o en un gas. El transporte molecular depende del movimiento de las moléculas individuales para realizar el transporte de masa, del calor o de la cantidad de movimiento.

El mecanismo de transporte puede ser desarrollado a partir de la teoría cinética de los gases y de los líquidos, o bien tomando como base otras consideraciones de la Física del estado sólido.

Cada molécula de un sistema tiene una cierta cantidad de masa, energía térmica y cantidad de movimiento asociados con ella. El transporte de masa tiene lugar cuando se encuentran presentes en la misma fase gaseosa diferentes clases de moléculas.

La energía térmica puede ser definida generalmente, como la parte de energía interna de una molécula que puede ser transferida bajo la influencia de un gradiente de temperatura disponible.

Si una molécula posee mayor energía interna en virtud de tener una temperatura superior que sus vecinas, puede transferir el exceso de energía a aquellas moléculas energéticamente inferiores.

El transporte de cantidad de movimiento en un fluido depende de la transferencia de la cantidad de movimiento macroscópico de las moléculas presentes en el sistema.

Si un fluido está en movimiento, las moléculas poseerán una cantidad de movimiento macroscópico en la dirección del flujo. Si hay una variación de la velocidad de flujo, las moléculas que se mueven más rápidamente tendrán una cantidad de movimiento mayor en la dirección del flujo, y pueden transferir el exceso de cantidad de movimiento a aquellas moléculas vecinas que se mueven más lentamente.

El transporte de masa realizado por movimiento molecular individual, se llama generalmente difusión molecular. El transporte molecular del calor se denomina conducción. El transporte de cantidad de movimiento molecular tiene lugar en el flujo laminar.

#### 2.4.2 Fluidos newtonianos

Los fluidos con una viscosidad constante e independiente de la velocidad de tensión y del tiempo de aplicación se llaman fluidos newtonianos. Todos los gases y los líquidos puros con bajo peso molecular se comportan como tales. Las mezclas miscibles de los líquidos de pesos moleculares bajos, son también newtonianas.

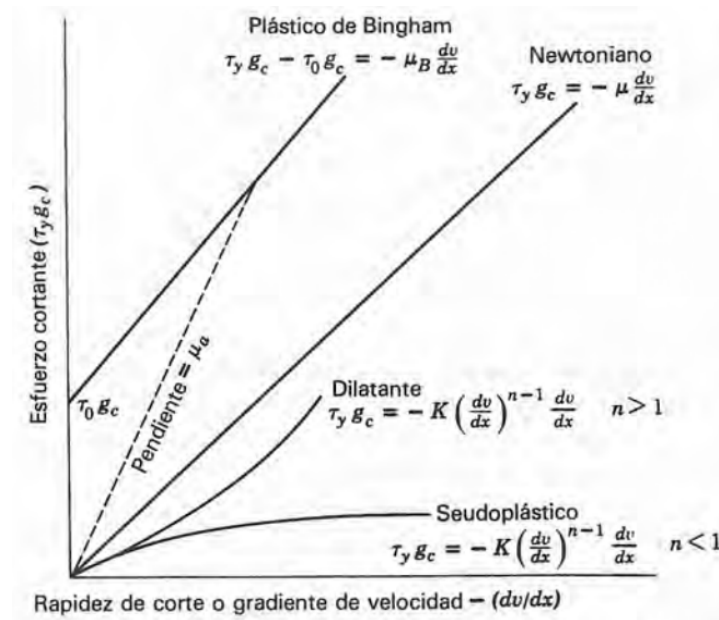


Figura 3. Comportamiento de fluidos bajo el efecto de una acción cortante.

En la figura 3, los fluidos newtonianos están representados por una línea recta que pasa por el origen. En ese caso, la viscosidad aparente es igual a la viscosidad absoluta en todas las partes de la curva. El modelo descrito para los gases de basa en un espacio libre y continuo a través del cual se encuentran distribuidas las moléculas en movimiento. Las moléculas constituyen una pequeña fracción del volumen disponible.

El modelo para los líquidos se basa en un espacio lleno con una fase continua de moléculas compactas. El espacio entre las moléculas, similar al sendero libre medio, es muy pequeño, menor que las dimensiones reales de las moléculas. Las hileras moleculares constituyen la fase continua y los agujeros o espacios libres, forman la fase dispersa. El transporte en un líquido, se lleva a cabo cuando una molécula de la hilera emigra a un agujero, esto se puede apreciar en la figura 4.

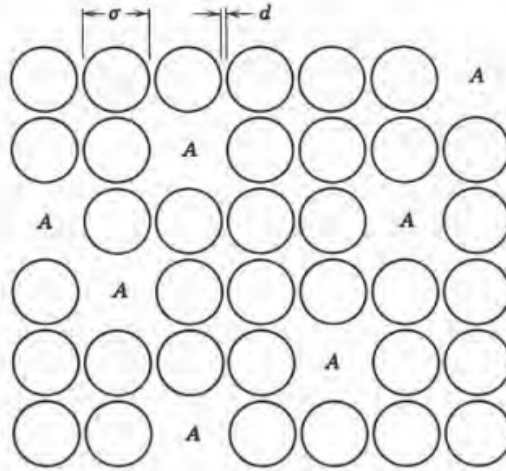


Figura 4. Modelo simple de un líquido es el diámetro molecular;  $d$  es la distancia libre entre moléculas;  $A$  es un "agujero" entre moléculas.

El número de agujeros en un líquido está relacionado con la densidad del mismo; esto significa que, mientras más agujeros, la densidad será baja, y viceversa.

En el transporte de cantidad de movimiento, cuando una molécula emigra a un agujero, en una región adyacente, lleva consigo la cantidad de movimiento original. Además, aquellas moléculas de la región original que no emigran, están aún sujetas a las fuerzas de atracción de las moléculas vecinas en regiones adyacentes de velocidad diferente.

Cuando la molécula emigra de su hilera al agujero, entonces pueden ser transportadas tanto la masa como la cantidad de movimiento y la energía térmica. Además, la energía térmica y la cantidad de movimiento pueden ser también transportadas por colisión entre las moléculas. Así que, la energía térmica y la cantidad de movimiento pueden ser transportadas por dos mecanismo separados en los líquidos, en tanto que la masa puede ser transportada únicamente por un mecanismo.

Las propiedades del transporte de agua se observan en la tabla 3:

D	$5.25 \times 10^{-5}$ pies <sup>2</sup> /hora
$\alpha$	$550 \times 10^{-5}$ pies <sup>2</sup> /hora
v	$6950 \times 10^{-5}$ pies <sup>2</sup> /hora

Tabla 3.- Propiedades de transporte de agua

*D = Difusibilidad de lamasa*

*$\alpha$  = Difusibilidad térmica*

*v = Velocidad de difusión en dirección y*

El valor de D es la difusibilidad del agua difundiéndose a través del agua, es decir el coeficiente de autodifusión. Comparando estos valores de difusibilidades, se encuentra que la migración es de menor importancia para el transporte en los líquidos de lo que lo es para los gases.

La energía térmica puede transmitirse a través de los líquidos sin que exista migración de moléculas. El modelo líquido que se presentó en los postulados de la migración como el medio de transporte, puede presentar ésta en la dirección del flujo o en la dirección de la transferencia. Los líquidos muestran generalmente una disminución en la conductividad térmica a medida que se aumenta la temperatura; sin embargo, naturalmente, existen sus excepciones, como la gasolina.

La fracción del total de moléculas que poseen un componente de la velocidad a través de la corriente puede moverse a regiones en que la velocidad de flujo es diferente de la velocidad

de origen de la molécula emigrante, con el consecuente transporte de cantidad de movimiento.

### 2.4.3 Flujo laminar

En régimen laminar el movimiento del fluido en conjunto se efectúa sólo en dirección  $y$ , mientras que la cantidad de movimiento se transfiere por movimiento desordenado de las moléculas individuales en la dirección  $x$ . El transporte molecular depende del movimiento azaroso de las moléculas individuales para el transporte de la masa, calor o cantidad de movimiento.

### 2.4.4 Flujo turbulento

El movimiento turbulento se debe al movimiento desordenado de grandes grupos de moléculas o conjunto de ellas. Estos grupos de moléculas se llaman remolinos, y en algunos casos son lo suficientemente grandes para ser visibles a simple vista. La masa, el calor y la cantidad de movimiento pueden transferirse por transporte turbulento en cualquier fluido.

### 2.4.5 Número de Reynolds

- 1) Sobre cierta velocidad promedio para un sistema dado, se forman remolinos relativamente grandes que fluyen a través de la corriente mediante una conducta azarosa.
- 2) Los remolinos son mayores y más abundantes en el centro del tubo.
- 3) Un aumento en la velocidad promedio del fluido amplía el corazón turbulento hasta que el tubo se llena esencialmente con el corazón de remolinos. A mucha más alta velocidad la actividad de los remolinos es extremadamente grande.

En el flujo turbulento la escala de masa emigrante es mucho mayor en el flujo turbulento. Ya que el remolino tiene un componente de flujo cruzado al azar sobrepuesto al flujo principal, es razonable suponer que la cantidad de movimiento puede transferirse, debido al movimiento cruzado de los remolinos, así como por movimiento molecular cruzado.

## 2.5 Transferencia de calor y de masa en flujo turbulento

La cantidad de los remolinos en la turbulencia sirve como mecanismo de transferencia para la cantidad de movimiento. Además, puesto que partículas gruesas del fluido se mueven en flujo transversal, esta actividad de los remolinos sirve también como medio para un mezclado físico.

El mezclado físico es importante en la transferencia de masa y de calor. La suposición de un perfil parabólico de velocidad no es correcta si se encuentra operando cualquier gradiente de temperatura, ya que la viscosidad se afecta por los gradientes térmicos.

### 2.5.1 Mezclado de Agua

Se logra una mezcla homogénea a partir de dos o más fluidos debido al intercambio de calor que existe entre los mismos. Se define como calor a la cantidad de energía intercambiada desde un cuerpo más caliente hacia uno más frío. Esta transferencia de energía ocurre hasta que el sistema (parte del Universo en estudio) se encuentre en equilibrio térmico.

Se dice que un sistema está en equilibrio térmico cuando ha alcanzado la condición de estado estable, en la que no tiene lugar intercambio neto de energía entre cualquiera de las partes del sistema y sus temperaturas son idénticas (temperatura final del equilibrio).



Se define sistema adiabático a aquel sistema aislado que no intercambia calor con el medio.

Asimismo, un calorímetro ideal o perfecto es aquel que no intercambia calor con las restantes partes del sistema, es decir que no entrega ni absorbe calor del resto del sistema.

La capacidad calorífica de un cuerpo o sustancia se define por:

$$C = \Delta Q / \Delta T \quad (2)$$

Donde:

$\Delta Q$  = Cantidad que debe intercambiarse para efectuar un cambio  $\Delta T$  en la temperatura

Considerando un sistema adiabático, un calorímetro “ideal” y una mezcla de dos masas de agua a distintas temperaturas, se sabe que después de un cierto tiempo se alcanzará una determinada temperatura final. Para calcular la temperatura de equilibrio se recurre a la conservación de la energía. Como no se efectúa trabajo mecánico, se mantiene la energía térmica total del sistema. Por tanto, se puede definir:

Ganancia de calor (por una parte del sistema) + pérdida de calor (por otra parte del sistema)  
= 0

Esta ecuación de conservación se puede escribir en términos de masas, calores específicos y diferencias de temperatura de los diversos componentes:

$$T_m = \frac{F_1 C_{e1} T_1 + F_2 C_{e2} T_2}{F_1 C_{e1} + F_2 C_{e2}} \quad (3)$$

$F_1$  = Flujo caliente

$C_{e1}$  = Calor específico del flujo caliente

$T_1$  = Temperatura de flujo caliente

$F_2$  = Flujo frío

$C_{e2}$  = Calor específico del flujo frío

$T_2$  = Temperatura de flujo frío

$T_m$  = Temperatura de mezclado

Como puede observarse a partir de la ecuación anterior, un sistema de mezclado de agua es un sistema multivariable con 4 entradas, 2 de flujo y 2 de temperatura y 2 salidas, 1 de temperatura y 1 de flujo de salida. La diferencia entre las temperaturas de entradas, condiciona el rango de opciones que se tienen para seleccionar una temperatura deseada, dado que las condiciones del sistema no permiten modificar las variables de temperatura de entrada, pero si es posible manipular los flujos de entradas y mediante el mezclado obtener una temperatura deseada.

## 2.6 Sistema de mezclado de agua propuesto

El sistema de mezclado presente en la mayoría de las instalaciones residenciales consta de tanques de almacenamiento, que proporcionan un flujo caliente y frío. Los flujos de agua caliente y de agua fría son mezclados mediante un sistema de tuberías, en ellos la apertura y cierre de las válvulas de control permiten mezclar los dos fluidos a fin de obtener una temperatura deseada. El esquema del sistema a controlar puede observarse en la figura 5.

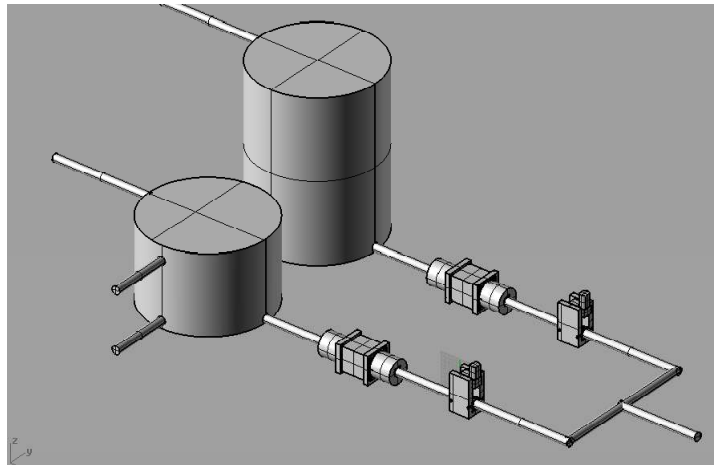


Figura 5.- Modelo físico del sistema de mezclado propuesto.

Como puede observarse en la figura 5, el sistema consta de 2 entradas de flujo, una con agua caliente y otra con agua fría. Además el sistema mezclador cuenta con una sola salida de flujo con su respectiva temperatura.

## 2.7 Lógica difusa

La lógica difusa puede controlar sistemas no lineales que serían difíciles o imposibles de modelar matemáticamente, esto abre la puerta para controlar sistemas que normalmente serían inviables de automatizar.

Las respuesta dinámica y la estabilidad del Controlador basado en lógica difusa es mucho mejor que el controlador convencional PI y PID. La lógica difusa está basada en la teoría de los conjuntos difusos [1],[2],[3],[4],[5],[6],[7] y, a diferencia de la lógica clásica, su objetivo es modelar la imprecisión y los formas de razonamiento y pensamiento que juegan un papel esencial en la notable capacidad humana para tomar decisiones racionales en un ambiente de incertidumbre y precisión[8].

Los sistemas difusos están ganando una amplia aceptación en una gran variedad de campos, desde la ingeniería hasta el área comercial [9],[10],[8],[11]. La razón de aumento de interés reside en su intrínseca generalidad, flexibilidad y buen desempeño en muchas aplicaciones donde otros métodos terminan por fallar o llegan a ser complicados.

La parte esencial de un controlador basado en lógica difusa es un conjunto de reglas de control relacionadas con los conceptos de implicación y composición en las reglas de inferencia. El control basado en lógica difusa proporciona un algoritmo que puede convertir la estrategia lingüística basada en el conocimiento experto en una estrategia de control automático [12].

La aplicación de la lógica difusa en los sistemas de control fue iniciada por Mamdani [13], quien satisfactoriamente llevó a cabo un estudio piloto en una máquina de vapor utilizando sistemas difusos. Su estudio mostró que los sistemas difusos pueden ser rentables y fácilmente utilizables por los ingenieros de control. Un número de satisfactorias aplicaciones de control han sido reportadas [8],[14],[15],[16],[17] el cual incluye un proceso de intercambio de calor [18], control de motor de vapor [19],[20], control de horno de cemento [21], control de navegación de un helicóptero no tripulado[22], control de robots manipuladores [23],[24],[25].

A pesar de las muchas aplicaciones que han aparecido en la ciencia de los sistemas, especialmente en el modelado y control, no hay un procedimiento sistemático en el diseño de sistemas difusos. Usualmente las reglas lingüísticas son generadas por la conversión de la experiencia del humano operador en reglas lingüísticas. Desafortunadamente, es difícil para los diseñadores de sistemas el obtener reglas difusas óptimas porque son en su mayoría influenciadas por la intuición de los operadores y los diseñadores de sistemas.

Uno de los acercamientos más satisfactorios han sido los intentos de hibridación en el marco del cómputo, donde los algoritmos genéticos son usados para proporcionar la capacidad de aprendizaje para sistemas difusos y que son llamados sistemas difuso-genéticos[26],[27],[28],[29],[30].

Un concepto importante en relación a las propiedades de los sistemas de control difuso es la estabilidad del sistema difuso. El análisis de estabilidad de los sistemas difusos es difícil porque los sistemas difusos son esencialmente sistemas no lineales. En años recientes, muchos trabajos de investigación de relevancia significativa han sido dados a conocer en relación con los problemas de estabilidad [31],[32],[33]. Aunque los estudios de análisis de

estabilidad de los sistemas Mamdani son difíciles, algunos análisis satisfactorios han sido presentados recientemente. Estos incluyen el método directo de Lyapunov para la estabilidad de sistemas de control difusos [34], análisis de estabilidad de los sistemas dinámicos difusos a través de transiciones de célula-estado en hypercubos difusos [35] entre otros.

## 2.8 Control Difuso

### 2.8.1 Revisión Histórica

Desde el punto de vista de aplicaciones, se pueden reconocer 3 fases naturales en el desarrollo de la teoría de los conjuntos difusos.

1.- El periodo de 1965-1977, usualmente referido como la fase académica que se caracteriza por el desarrollo de los fundamentos de la teoría de conjuntos difusos y sólo una especulación inicial acerca de la aplicación futura de dicha teoría.

2.- El periodo de 1978-1988, referido como la fase de transformación, está caracterizada no solo por los avances significativos en la teoría de conjuntos difusos, sino por algunos avances prácticos en la aplicación de la teoría. El número de contribuciones se incrementa rápidamente en campos como la economía y la industria.

3.- El periodo actual, que comenzó desde 1989 es usualmente referido al “fuzzy boom”, el cual se caracteriza por un rápido crecimiento de aplicaciones satisfactorias en campos económicos, industriales y académicos.

### 2.8.2 Fusificación

Mediante una descripción lingüística se describen cada una de las entradas y salidas del controlador difuso. El proceso de fusificación es el acto de obtener un valor de una variable

de entrada y encontrar los valores numéricos de la función de membresía que son definidos para esa variable.

### 2.8.3 Conjuntos difusos

Los conjuntos difusos son utilizados para cuantificar la información en la base de reglas, el mecanismo de inferencia opera sobre los conjuntos difusos para obtener conjuntos difusos; por lo tanto, es necesario especificar como el sistema difuso va a convertir sus entradas numericas en conjuntos difusos, lo que a este proceso se le conoce como fusificación, para que puedan ser utilizados por el sistema difuso.

### 2.8.4 Completitud de un Conjunto Difuso

Cada función de membresía debe tener un significado claro y debe definir un rango del universo del discurso en el cual tiene preferencia sobre otras funciones de membresía. La completitud de un conjunto difuso establece el umbral común para las zonas de operación de las funciones de membresía. Por ejemplo la completitud de la figura 6 es igual a 0.5

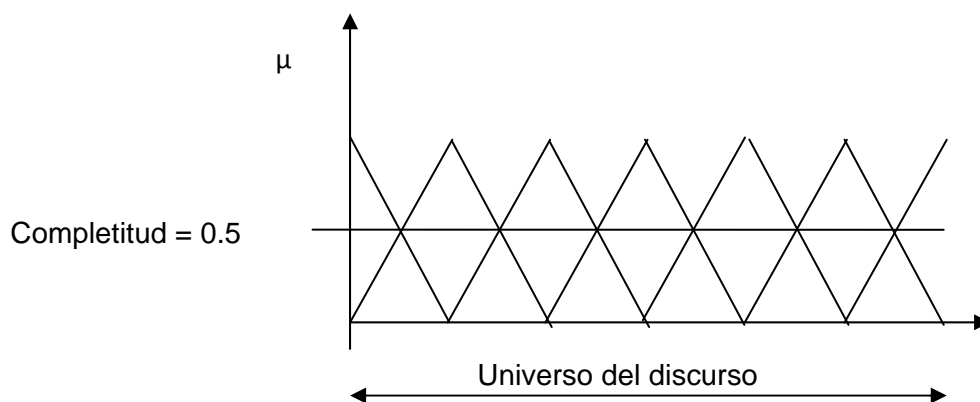


Figura 6.- Grado de completitud de un conjunto difuso

Algunos autores [46] sugieren un mínimo de nivel de completitud  $\epsilon = 0.25$ , otros [47] sugieren un promedio de completitud  $\epsilon = 0.5$ . Cuando la completitud es mayor a 0.5 existen zonas inoperantes, que si no son perjudiciales, son redundantes. Cuando la completitud es menor a 0.25 la regla es dominante en una región muy baja, lo que crea un riesgo de control ineficiente. El nivel mínimo de completitud requerido para aplicaciones de control es  $\epsilon = 0.25$ , lo que garantiza la convergencia de control, y un nivel máximo de completitud  $\epsilon = 0.50$  proporciona un tiempo corto de respuesta [48]. Se argumenta que cuando  $\epsilon = 0.50$  para cada valor de entrada existe siempre una regla dominante. Cuando la completitud es menor a 0.25 existen regiones del universo del discurso que se caracterizan por un bajo grado máximo de verdad que activan reglas con un bajo grado de membresía ( $\epsilon < 0.25$ ). El grado de completitud  $\epsilon = 0.5$  es probablemente la mejor forma de definir las funciones de membresía desde el punto de vista de control [49].

Para aplicaciones de control las funciones de membresía son frecuentes las funciones lineales (triangular y trapezoidal). El uso de funciones de membresía lineales provee una menor sensibilidad a las pequeñas variaciones que provienen de la no linealidad de los elementos de medición para la determinación de las entradas [45].

Una gran resolución y exactitud se alcanza con un gran número de funciones de membresía. [88,99,120]. Se debe de tener por lo menos una entrada en la que su valor es uno, es decir, que se está completamente seguro que con esa entrada se obtiene el valor máximo de certeza y activa totalmente una regla. La distribución de las funciones de membresía es uniforme en el rango de operación [46], sin embargo, en algunos casos las funciones de membresía pueden acumularse en zonas en las que se desea un control más exacto. Se debe considerar que para cada posible entrada por lo menos una regla debe ser activada.

### 2.8.5 Variables lingüísticas

Se trata de descripciones simbólicas constantes de en lo que general son cantidad variantes en el tiempo para describir entradas y salidas de sistemas difusos. Los valores lingüísticos son generalmente términos descriptivos tal como los adjetivos utilizados para describir objetos.

### 2.8.6 Funciones de membresía

Las funciones de membresía permiten cuantificar el significado de los valores lingüísticos. Como se explicó anteriormente, las descripciones y valores lingüísticos no son precisos, por lo que debemos cuantificarlos para poder realizar operaciones y generar estrategias de control. La función de membresía cuantifica de una manera continua, que valores le pertenecen al conjunto de valores que existen en cada variable lingüística. La función de membresía no cuantifica un comportamiento aleatorio, hace más preciso el significado de las descripciones lingüísticas.

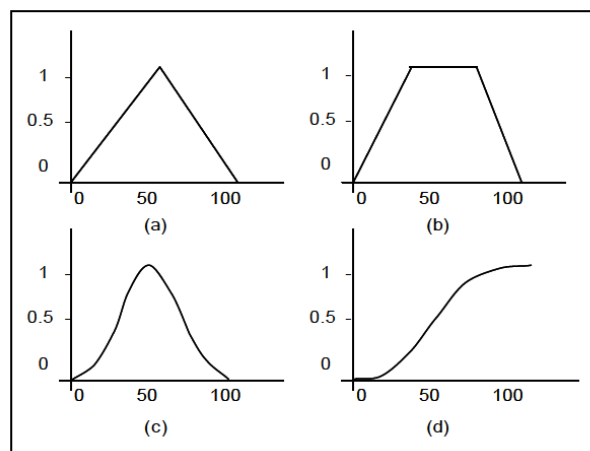


Figura 7.- Formas de las funciones de membresía (a) triangular, (b) trapezoidal, (c) gaussiana, (d) sigmoidal



### 2.8.7 Reglas de inferencia difusa

La base de reglas es la forma en que se representa el conocimiento de cómo controlar un sistema y se expresa en forma de sentencias “Si Premisa, Entonces Conclusión”. En ella se almacena el conocimiento que se tiene sobre el sistema en forma de reglas que se combinan entre sí para formar un único conjunto difuso de salida

El número de entradas y salidas de un controlador difuso pone un límite superior e inferior del número de elementos en las premisas y consecuentes. Es importante señalar que se especifica un número finito de variables y valores lingüísticos, por lo que sólo existe un número finito de posibles reglas.

El mapeo de las entradas a las salidas para los sistemas difusos es una parte caracterizada por un conjunto de condición  $\rightarrow$  reglas de acción, ó en *modus ponens* la forma (Si, entonces):

**Si, premisa, Entonces, consecuente.**

### 2.8.8 Defusificación, método de la media ponderada.

El proceso de defusificación es el componente final de un controlador difuso. Opera en los conjuntos difusos que son generados por el mecanismo de inferencia y combina sus efectos para generar una salida numérica hacia el elemento de control. El método de la media ponderada es válido para funciones de membresía simétricas [50].

$$x^* = \frac{\sum_{i=1}^n m^i w_i}{\sum_{i=1}^n m^i} \quad (4)$$

Donde:

$x^*$  = valor de salida defusificado

$m^i$ = valor de cada función de membresía de salida

$w_i$ = peso de cada función de membresía de salida

### 2.8.9 Estructura general de un Controlador Difuso

El control difuso proporciona una metodología formal para representar, manipular a implementar un conocimiento heurístico acerca de cómo controlar un sistema. El diagrama de bloques de un controlador difuso se presenta a continuación, donde se muestra un controlador difuso integrado en un lazo de control cerrado de un sistema.

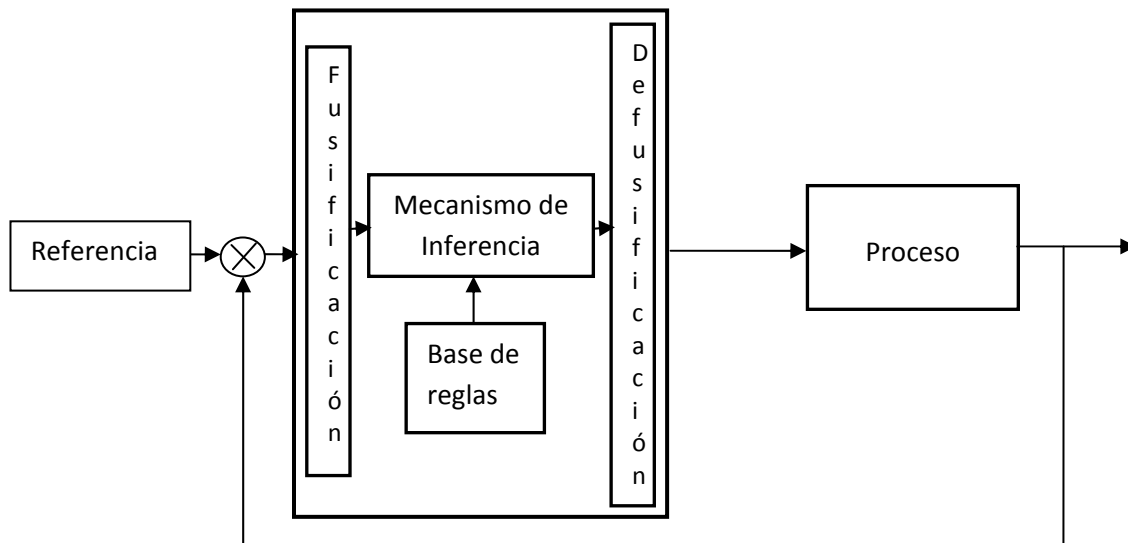


Figura 8.- Estructura de un Controlador Difuso

Un controlador difuso se compone de 4 partes principales:

- 1) La base de reglas. Contiene el conocimiento en la forma de un conjunto de reglas que representan la manera de controlar el sistema. El mecanismo de inferencia. Evalúa que reglas de control son relevantes en determinado tiempo y decide envía una acción de control a la planta.

- 2) Interface de fusificación. Modifica las entradas de manera que puedan ser interpretadas y comparadas con las reglas que se generaron en la base de reglas del controlador.
- 3) Interface de defusificación. Convierte las conclusiones alcanzadas por el mecanismo de inferencia en entradas al sistema.

## 2.8.10 Estructura del controlador Difuso Propuesto

La estructura del controlador Difuso propuesto se puede observar en la figura 9:

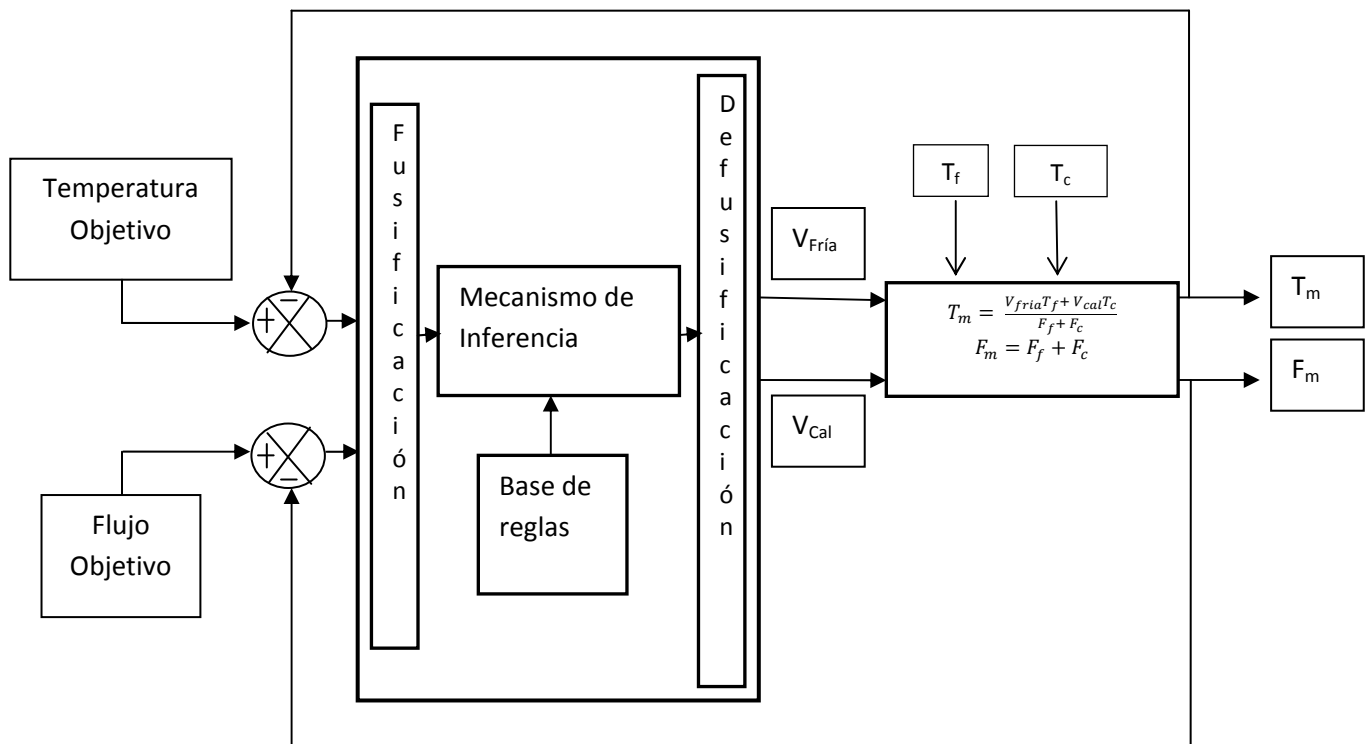


Figura 9. Estructura del Controlador Difuso Propuesto

El controlador consta de 2 entradas de referencia y dos salidas que son la temperatura y flujo de mezclado. La parte de procesamiento difuso consta de su etapa de fusificación, el mecanismo de inferencia y la etapa de defusificación.

## 2.9 Ventajas del control difuso

Los beneficios del controlador difuso se pueden resumir de la siguiente manera:

- 1.- Los controladores difusos son más robustos que los controladores PID porque pueden cubrir una gama más amplia de condiciones de operación que un controlador PID, y pueden operar con ruido y disturbios de distinta índole.
- 2.- El desarrollo de controladores difusos es más eficiente que el desarrollo de controladores basado en el modelo del sistema u otros que realizan la misma operación.
- 3.- Los controladores difusos son adaptables, desde que es mucho más sencillo como entender y modificar su estructura, la cual no usa solo la estrategia del operador humano, sino también está expresada en términos lingüísticos naturales.
- 4.- Es sencillo el aprender cómo operan los controladores difusos y el aprender a diseñarlos para aplicarlos en aplicaciones concretas.

Es importante resaltar que la lógica difusa puede ser mezclada con técnicas de control convencional. Esto significa que los sistemas difusos no necesariamente reemplazan los métodos de control convencional. En muchos casos, los sistemas difusos aumentan y simplifican su implementación [36][37].

## 2.10 Aplicaciones del Control Difuso

Shakowat Zaman [38] describe el desarrollo de un sistema de control de temperatura basado en la lógica difusa con dos entradas y una salida. Utiliza la temperatura y los sensores de humedad para el control por retroalimentación, además de tres elementos de control para la calefacción, la refrigeración y la humedad, en el trabajo se formulan las reglas

difusas para la temperatura y la humedad. Para controlar la temperatura ambiente, el controlador lee la temperatura ambiente después de cada período de muestreo, el diseño propuesto utiliza cinco funciones de pertenencia triangulares determinadas a lo largo de un rango de escala de 0 °C a 40 °C para la temperatura de entrada y de 0% a 100% de humedad relativa. Las cinco variables difusas de entrada de temperatura se denominan como: fría 0-10 °C, enfriar 0-20 °C, templado 10-30 °C, 20-40 °C caliente, y caliente 30-40 °C. en cuanto a la entrada de humedad, las variables difusas son: seco 0% -25%, no muy seco 0% -50%, húmedo 25% -75%, no muy mojado 50% -100%, y el rango de mojado 75% -100%. Este modelo de lógica difusa tiene como objetivo determinar la amplitud de la señal de voltaje de 0-5 volts a ser enviado al ventilador para mantener una temperatura deseada y constante en un ambiente confinado.

JyhShing Roger Jang et al. [39] presenta los conceptos de control y modelado difuso mediante redes unificadas adaptables con estrategias de fusificación y defusificación simple además de probar diferentes estructuras de modelos. Se presentan aproximaciones de razonamiento difuso para: reglas simples con simples antecedentes y reglas múltiples con múltiples antecedentes. Se presentan varios modelos difusos: Modelo difuso Mamdani, Sugeno, Tsukamoto además de presentar algunos ejemplos.

M. Yasin, F. et al., [41] presenta la implementación de un controlador de temperatura basado en la lógica difusa destinado a su aplicación industrial en el Fpga Altera, el cual permite la implementación en hardware eficientemente. El sistema está constituido de cuatro módulos principales: fusificación, mecanismo de inferencia, implicación y defusificación. El método de composición seleccionado para el modelo difuso es la composición Max-Min, mientras que el operador Min Mamdani fue elegido como el método de implicación. Cada módulo es

modelado individualmente utilizando el lenguaje de descripción VHDL. Los resultados de la simulación muestran que el modelo ha sido probado con éxito.

## 2.11 Modelo matemático

Para entender el comportamiento del sistema de mezclado que desea controlar, es necesario un modelo matemático, el cual permita describir las relaciones entre las entradas y las salidas mediante ecuaciones diferenciales. El modelo nos permite ganar un entendimiento claro del sistema que deseamos controlar.

Básicamente hay pocas formas en la actualidad para hacer esto. En primer lugar podemos utilizar los principios de la física para escribir una serie de ecuaciones que describen el sistema. Otra forma de hacerlo es mediante la “identificación del sistema”, lo cual se hace utilizando los datos reales de entrada y salida del sistema para producir un modelo del sistema.

En ocasiones una combinación de ambos métodos es utilizada donde en primer lugar empleamos las leyes de la física para escribir ecuaciones diferenciales que creemos representan el comportamiento del sistema, para consecuentemente realizar experimentos y simulaciones de la planta con la finalidad de determinar un modelo más preciso de la planta. Debe ser entendido que el modelo matemático para una planta se trata de una aproximación.

El modelo matemático es una abstracción, por lo tanto no puede representar perfectamente toda la dinámica posible en cualquier proceso. Sin embargo, es necesario un modelo matemático del sistema para conocer una aproximación en su dinámica en el tiempo para poder desarrollar un sistema de control. El modelo matemático puede ser usado para predecir el comportamiento de un sistema en condiciones específicas.

Como se muestra en la figura 10, existen dos entradas de flujo al sistema, cada una con su respectiva temperatura. Las entradas de flujo son reguladas mediante válvulas de control, dando como resultado un sistema multivariable de 4 entradas y 2 salidas.

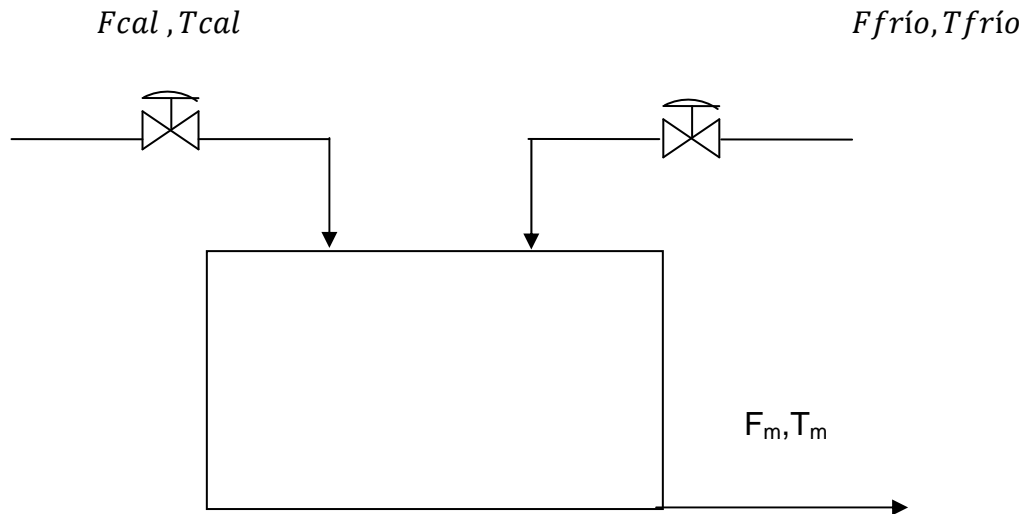


Figura 10.- Descripción sistemática del sistema de mezclado.

Como se aprecia en la figura 10, las salidas son la temperatura y el flujo de salida del sistema. Para describir la relación entre las entradas y salidas de un sistema se utilizan expresiones que sean funciones del tiempo. Para ello se recurre a una ecuación que exprese cómo varía con el tiempo la salida del sistema cuando la entrada también se modifica con el tiempo. Para este fin se utiliza una ecuación diferencial.

La ecuación de flujo se obtiene del balance de materia del sistema.

$$\frac{dv}{dt} = F_{cal} + F_{frío} - F_{sal} \quad (5)$$

Dónde:

$V$  = Volúmen de mezclado

$F_{sal}$  = Flujo de salida

$F_{cal}$  = Flujo de entrada caliente  
 $F_{frio}$  = Flujo de entrada frio

$$A \frac{dL}{dt} = F_{cal} + F_{frio} - F_{sal} \quad (6)$$

Dónde:

$A$  = Área del tanque de mezclado  
 $L$  = Altura del tanque de mezclado

$$A \frac{dL}{dt} = (F_{cal} * V_{cal}) + (F_{frio} * V_{frio}) - F_{sal} \quad (7)$$

Dónde:

$V_{cal}$  = Válvula de flujo caliente (0 – 1)  
 $V_{frio}$  = Válvula de flujo frío (0 – 1)

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{A} ((F_{cal} * V_{cal}) + (F_{frio} * V_{frio}) - F_{sal}) \quad (8)$$

La ecuación de temperatura es obtenida del balance de energía del sistema.

$$\frac{dVT_{sal}}{dt} = (F_{cal} * V_{cal}) + (F_{frio} * V_{frio}) - F_{sal} \quad (9)$$

Dónde:

$T_{sal}$  = Temperatura de salida del sistema

$$A \frac{dL}{dt} + AL \frac{dT_{sal}}{dt} = (F_{cal} * V_{cal} * T_{cal}) + (F_{frio} * V_{frio} * T_{frio}) - (F_{sal} * T_{sal}) \quad (10)$$

La densidad y el calor específico son los mismos en cada una de las entradas, entonces si combinamos la ecuación de temperatura con la ecuación de flujo, obtenemos:

$$(F_{cal} * V_{cal}) + (F_{frio} * V_{frio}) - F_{sal} = AL \frac{dT}{dt} + ((F_{cal} * V_{cal}) + (F_{frio} * V_{frio}) - F_{sal})/T_{sal} \quad (11)$$



Al realizar las operaciones algebraicas pertinentes, se obtiene la siguiente ecuación:

$$AL \frac{dT_{sal}}{dt} = (F_{cal} * V_{cal}(T_{cal} - T_{sal})) + (F_{frio} * V_{frio}(T_{frio} - T_{sal})) \quad (12)$$

Finalmente se obtienen las 2 ecuaciones que modelan el sistema de mezclado:

$$\frac{dL}{dt} = \frac{1}{A} ( (F_{cal} * V_{cal}) + (F_{frio} * V_{frio}) - F_{sal} ) \quad (13)$$

$$AL \frac{dT_{sal}}{dt} = (F_{cal} * V_{cal}(T_{cal} - T_{sal})) + (F_{frio} * V_{frio}(T_{frio} - T_{sal})) \quad (14)$$

## 2.12 Resumen

En este capítulo se presentaron las propiedades y la importancia que tiene el agua para los seres humanos. Además, se presentan los mecanismos de transporte molecular con la finalidad de comprender como se lleva a cabo el proceso de mezclado a nivel molecular. La teoría de la transferencia de calor y de masa se ha expuesto para entender dicho mecanismo de mezclado en los fluidos. Por otra parte se presentan una descripción de la lógica difusa y su aplicación en el control de procesos, es decir, el control difuso. Se expone desde una revisión histórica hasta la estructura del controlador. Al final del capítulo se presentan las ventajas en el uso de esta técnica y algunas aplicaciones en las cuales el control difuso ha dado muy buenos resultados. Para finalizar el capítulo se presenta el modelo matemático del sistema propuesto, a fin de realizar un análisis de la dinámica del sistema y poder entender su comportamiento.

## Capítulo 3

# DISEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO

### 3.1 Introducción

Como primera etapa del diseño del controlador, se define el rango de operación del sistema tanto para la entrada de error de temperatura como para la entrada de error de flujo. Una vez que se ha definido el rango, el siguiente paso es la definición de las funciones de membresía para las entradas y salidas. El siguiente paso es la selección del método de inferencia y la descripción de la base de reglas que controla el sistema. Mediante el método de defusificación se obtendrá una salida numérica que represente el conjunto difuso generado por el sistema de control, para que de esta manera el elemento final de control (válvulas) pueda ejercer una acción de control sobre el sistema.

### 3.2 Rango de operación del Controlador

La temperatura y el flujo de salida del sistema de mezclado se obtienen mediante la correcta dosificación tanto de agua caliente como de agua fría mediante 2 válvulas de control. Se propone una temperatura mínima de 15 °C y una temperatura máxima de operación de 40 °C. Para el caso de flujo las válvulas operan de totalmente cerrado a totalmente abierto, es decir, de 0 a 1. Como se trata de un sistema de control retroalimentado, las variables a corregir serán el error de temperatura y el error de flujo tal y como se observa en el tabla 4.

Entradas	Rango	Salidas	Rango
Error de Temperatura	-25 a 25	Válvula de Flujo Frío	-1 a 1
Error de Flujo	-1 a 1	Válvula de Flujo Caliente	-1 a 1

Tabla 4.- Descripción de las variables de entrada al controlador difuso

### 3.3 Variables de entrada

La única restricción que deben cumplir las funciones de membresía es que todos sus valores deben encontrarse dentro del rango de 0 a 1.

A partir del estudio de Vaughn Bradshaw, la zona de confort está delimitada por las temperaturas 22°C en su frontera inferior y 28°C en su frontera superior, lo que delimita el rango de temperaturas de confort a 6 °C.

El estudio de las zonas de confort en el ser humano provee la información necesaria para fusificar la variable de temperatura. La fusificación de la variable temperatura puede apreciarse en la figura 11.

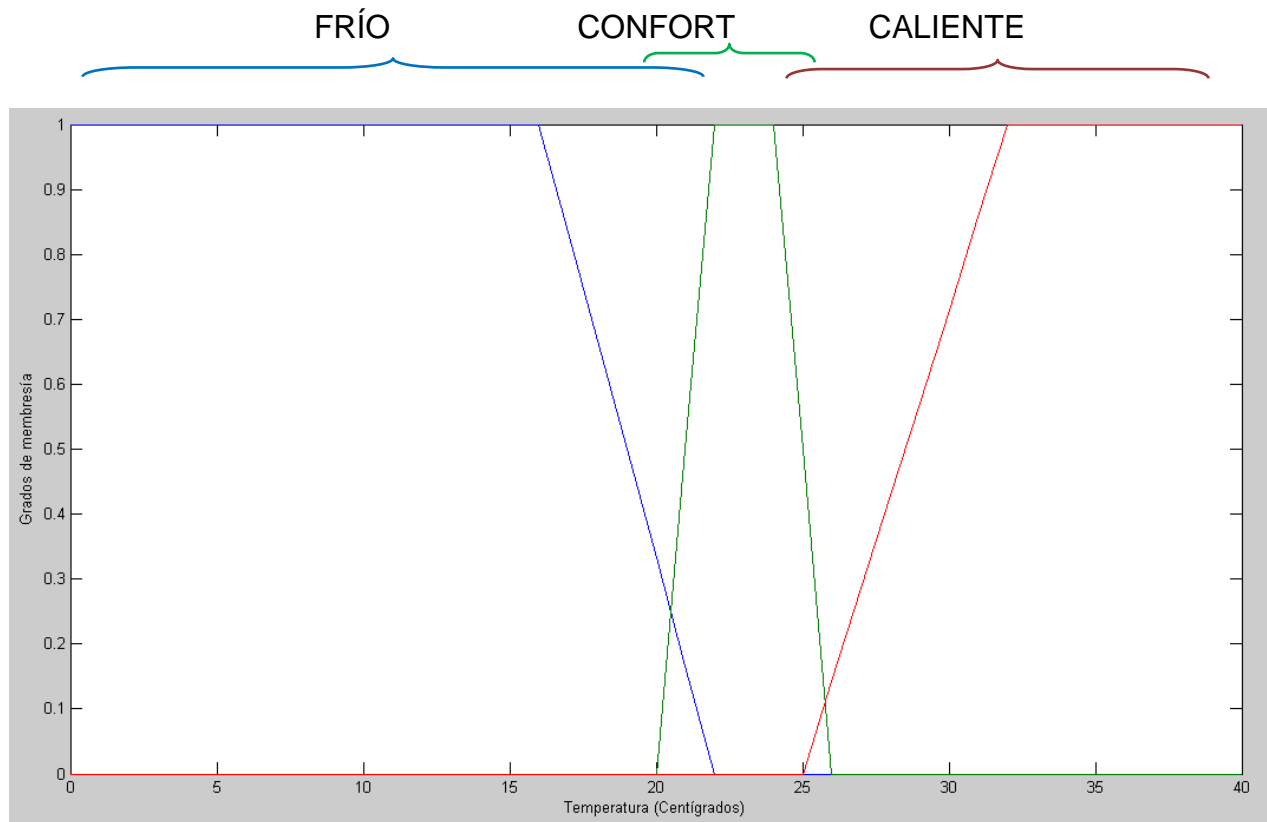


Figura 11.-Fusificación de la temperatura de confort humano.

Los 6°C que delimitan la zona de confort (22°C-28°C) interpretan el universo del discurso de la función de membresía ErrorTempNeutro. Esta función de membresía representa los cambios que puede admitir el controlador cuando ha alcanzado una temperatura deseada dentro del rango de confort. Con este parámetro como referencia, los puntos de corte en el eje x de la función de membresía ErrorTempNeutro son -6 y 6. De esta manera se cubre el rango de cambio que puede existir entre una disminución de 28°C a 22°C y un aumento de 22°C a 28°C.

Para establecer esta zona de influencia se utiliza el operador Min, con lo que se asegura que la función de membresía ErrorTempNeutro tiene una regla dominante en el rango de -3 a 3.

Para las zonas de operación de las funciones de membresía ErrorTempPositivo y ErrorTempNegativo existen regiones de operación donde las reglas dominantes proveen una rápida respuesta de corrección en el sistema es decir, de  $-6^{\circ}\text{C}$  a  $-25^{\circ}\text{C}$  y de  $6^{\circ}\text{C}$  a  $25^{\circ}\text{C}$ .

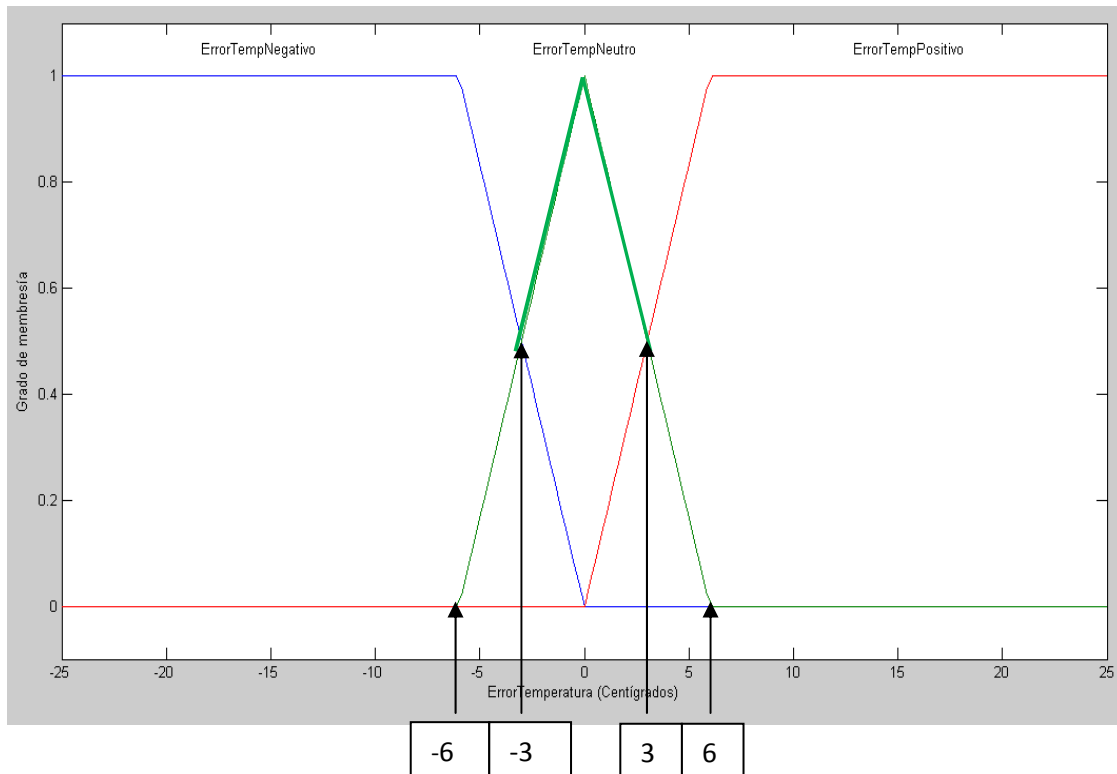


Figura 12.- Funciones de membresía para la variable ErrorTemperatura

Por su parte, la variable de entrada Errorflujo consta de 3 funciones de membresía: débil, correcto y fuerte. Se utiliza la forma triangular ya que es poco susceptible a las pequeñas variaciones producidas por la lectura de los sensores de entrada y se distribuyen uniformemente a lo largo del universo del discurso que va de -1 a 1. La definición de las funciones de membresía puede verse en la figura 13.

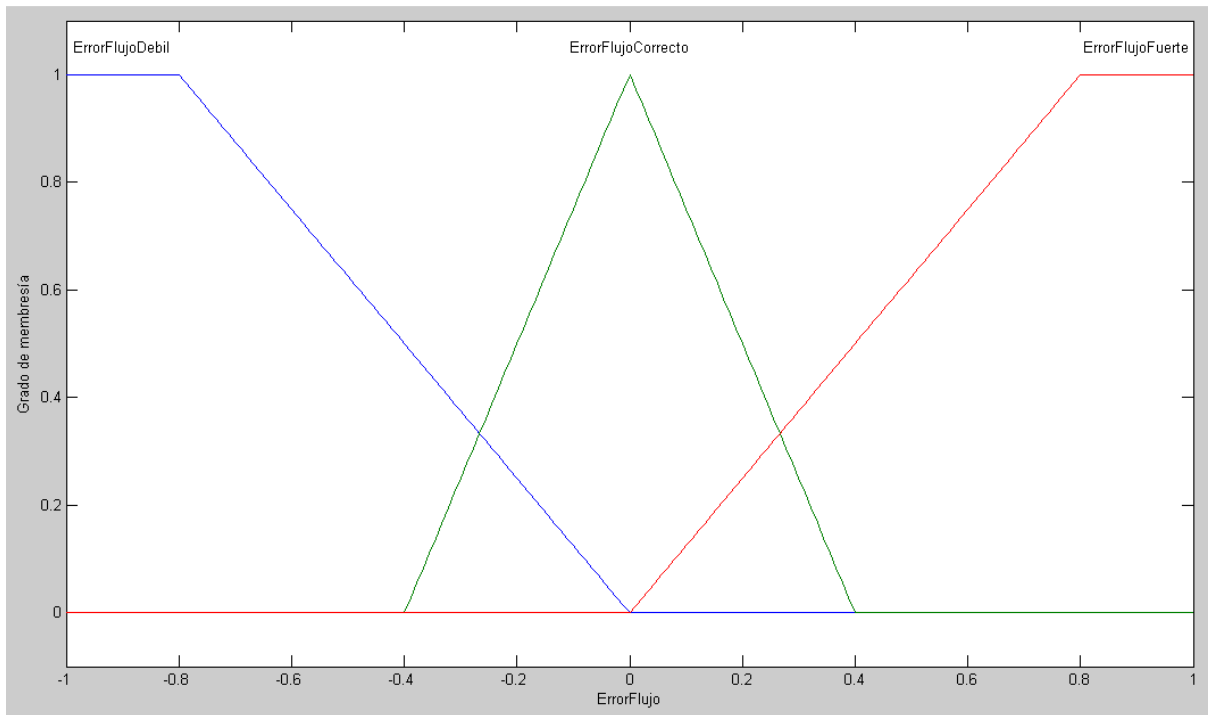


Figura 13.- Funciones de membresía para la variable ErrorFlujo

Las zonas de influencia se determinan mediante algún tipo de inferencia. Para esta aplicación se desea que la zona de influencia de la función ErrorFlujoDebil se encuentre dentro del rango de -1 a -0.4. La zona de influencia de la función ErrorFlujoCorrecto se encuentre de -0.4 a 0.4 y se desea que la zona de influencia de la función ErrorFlujoFuerte se encuentre en el rango de 0.4 a 1. Con el operador Min se obtiene el valor máximo entre dos conjuntos, lo que permite obtener las zonas de influencia deseadas.

### 3.4 Variables de Salida

Los elementos de control que nos permiten modificar la respuesta del sistema, tanto en la parte de temperatura, como de flujo, son una válvula que regula el flujo frío y una válvula que regula el flujo caliente.

Una válvula de control puede operar dentro del rango de estar completamente cerrada y el estar completamente abierta. Para representar las acciones de control de las válvulas, se definen 5 funciones de membresía, considerando a la válvula idealmente como completamente cerrada 0 y completamente abierta como 1 tal y como puede apreciarse a continuación en la figura 14 y 15 respectivamente.

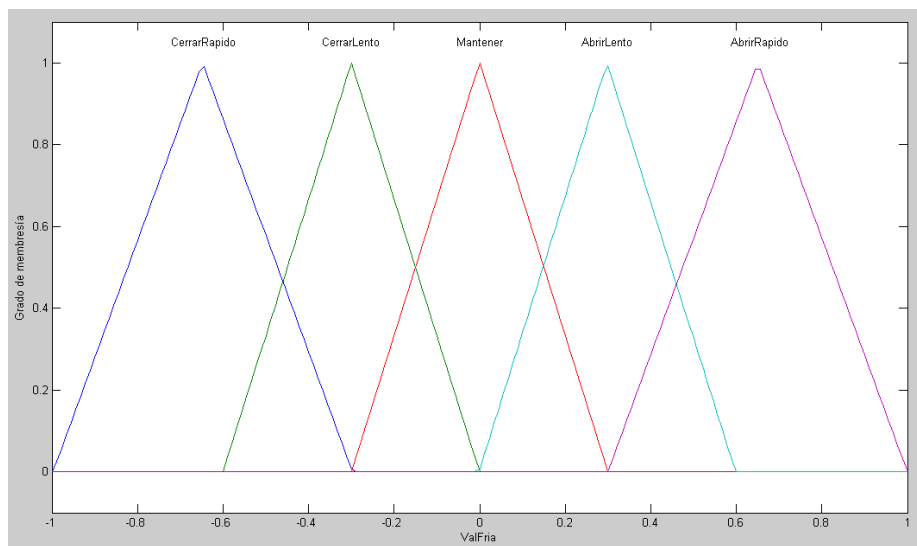


Figura 14.- Funciones de membresía de la variable de salida *ValFria*

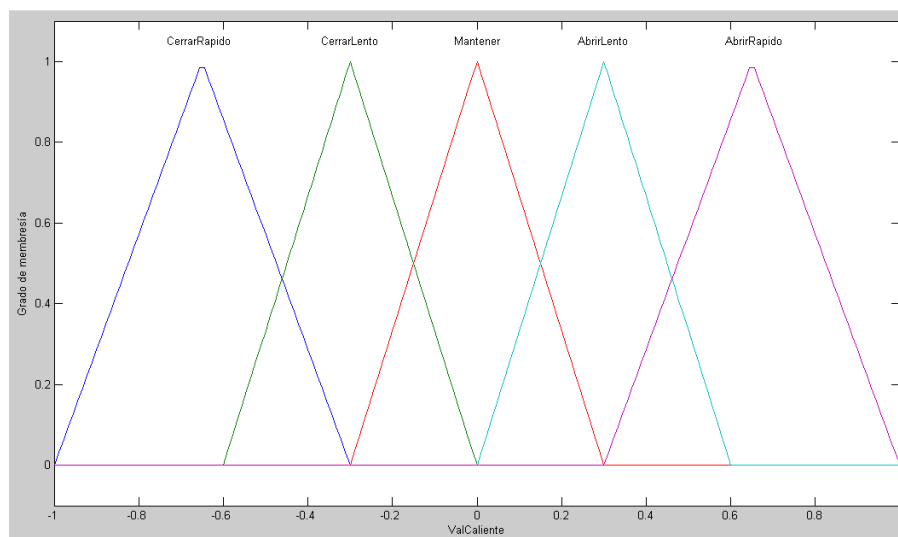


Figura 15.- Funciones de membresía de la variable de salida *Valcal*

Como las variables de flujo y temperatura pueden encontrarse en un valor superior o inferior a la referencia deseada, es necesario cerrar y abrir la válvula para conseguir el objetivo. Se definen 2 funciones de membresía para cerrar y abrir respectivamente, con lo que se espera aumentar la exactitud de la operación de la válvula de control. Las funciones de membresía para cerrar son Cerrar lento y Cerrar rápido, de manera similar las funciones de membresía para abrir la válvula son Abrir lento y Abrir rápido.

### 3.5 Reglas de Control

Las reglas que forman la base del conocimiento para el controlador pueden apreciarse en la tabla 5.

CONDICION								→	ACCIÓN						
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ARápido
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Bueno	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	ALento
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	ARápido	y	Vc	→	CLento
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ALento
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Bueno	entonces	Vf	→	Mantener	y	Vc	→	Mantener
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CLento
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ARápido	y	Vc	→	ALento
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Bueno	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	CLento
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CRápido

Tabla 5. Base de reglas de inferencia difusa



### 3.6 Método de defusificación

El método de la media ponderada es válido si los conjuntos difusos de salida son simétricamente normalizados, tienen un soporte compacto y cada regla es considerada de manera independiente [52]:

### 3.7 Ejemplo 1

Se desea que el sistema tenga una salida 20°C de temperatura y 0.7 % flujo de flujo. Las condiciones del sistema son las siguientes: Temperatura de agua fría= 10°C y temperatura de agua caliente=30°C. Las entradas al controlador son: ErrorTemp=0-20 =-20 y Errorflujo=0-0.7=-0.7

#### Etapas 1.- Fusificación

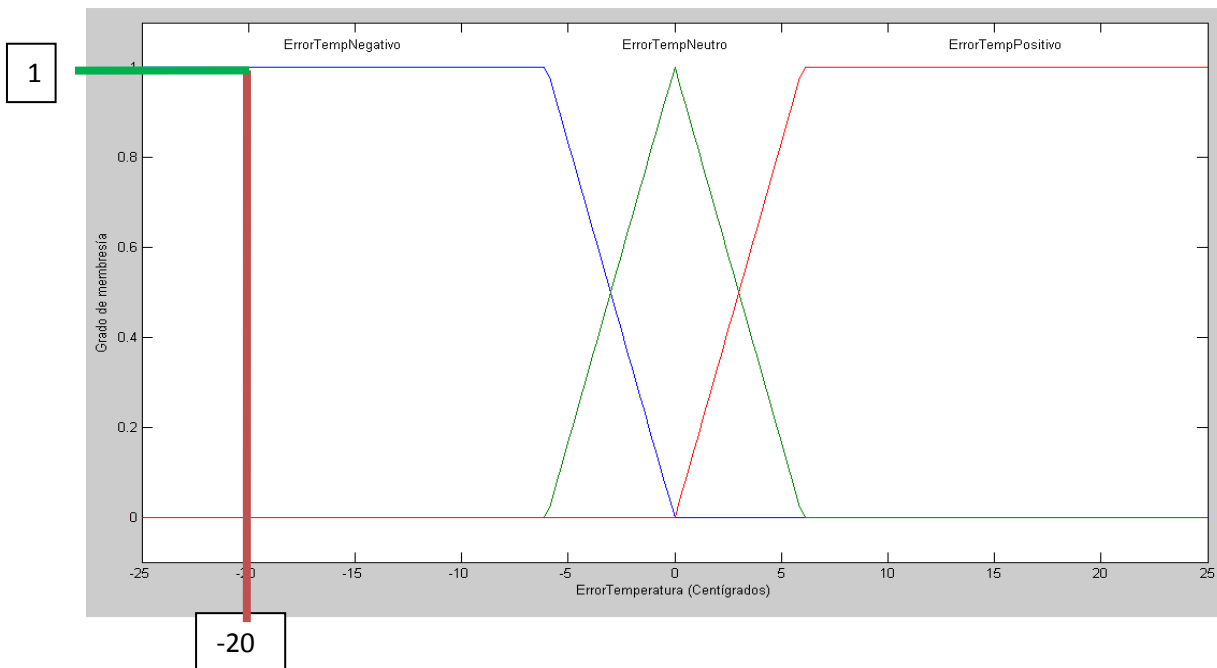


Figura 16.- Funciones de membresía de la variable ErrorTemp Ej.1

$$\mu(\text{Negativo})=1$$

$$\mu(\text{Neutro})=0$$

$$\mu(\text{Positivo})= 0$$

En la figura 15 es posible observar que el valor de memebresía 1 para la función de membresía Negativo permanecerá en 1 en el rango de operación de -25 a -6 y comenzará a disminuir en cuanto se aproxime a la región de -6 a 0. En el punto de -3 existe una transición de Negativo a Neutro y para valores menores a -3, la función de membresía pierde su operación, dando paso a la influencia de la función de membresía Neutro. El paso siguiente corresponde al cálculo de las funciones de membresía para la variable de entrada Error de Flujo.

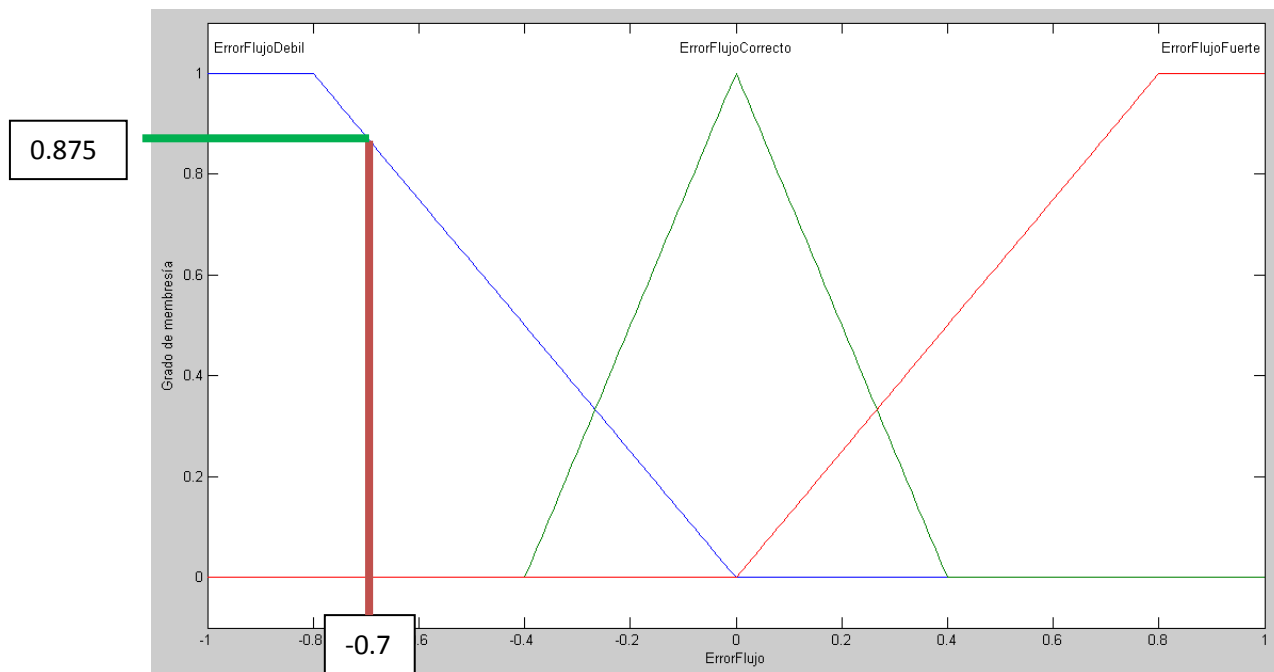


Figura 17.- Funciones de membresía de la variable Errorflujo Ej. 1

Los grados de membresía de la entrada ErrorFlujo resultantes son:

$$\mu(\text{Debil}) = 0.875$$

$$\mu(\text{ErrorFlujoCorrecto}) = 0$$

$$\mu(\text{ErrorFlujoFuerte}) = 0$$

## Etapa 2.- Inferencia

Se evalúan las reglas mediante el operador Min.

CONDICIÓN								→	ACCIÓN						
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ARápido
			1				0.875	MIN			0.875				0.875
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	ALento
			1				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CRápido	y	Vc	→	CLento
			1				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ALento
			0				0.875	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	Mantener	y	Vc	→	Mantener
			0				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CLento
			0				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ARápido	y	Vc	→	ALento
			0				0.875	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	CLento
			0				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CRápido
			0				0	MIN			0				0

Tabla 6. Base de reglas de inferencia difusa Ej.1

V Fría					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0	0	0	0.875	0
MAX	0	0	0	0.875	0
V Caliente					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0	0	0	0	0.875
MAX	0	0	0	0	0.875

Tabla 7. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.1

### Etapa 3.- Defusificación.

Defusificación de las variables de salida.

De acuerdo a la tabla 7, se observa que la única función de membresía de salida que tiene un valor numérico mayor a 0 es la función de ALento, de tal manera que es la única función de membresía que se necesita defusificar. Para defusificar el conjunto difuso generado se utiliza el método de la media ponderada como puede observarse a continuación.

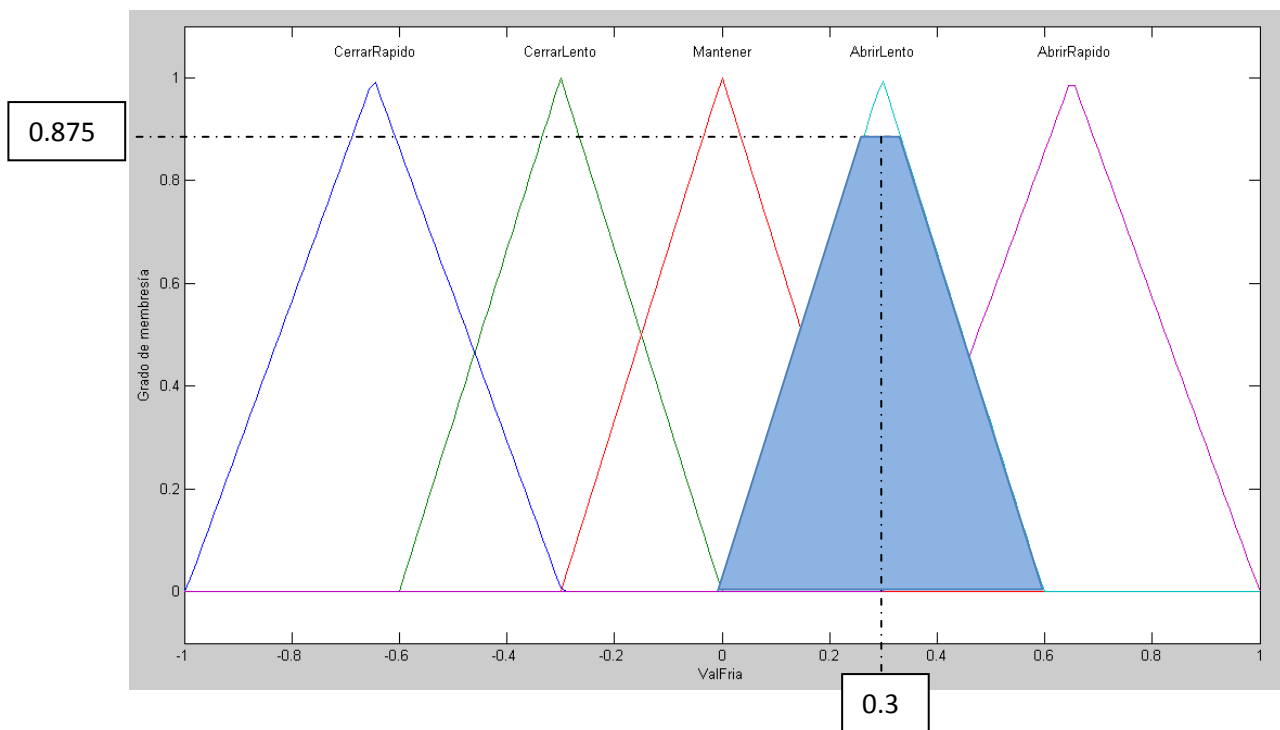


Figura 18.- Defusificación de la variable de salida Vfria Ej.1

Se aplica el método de defusificación de la media ponderada.

$$V_{fria} = \frac{0.3 * 0.875}{0.875} = 0.3$$

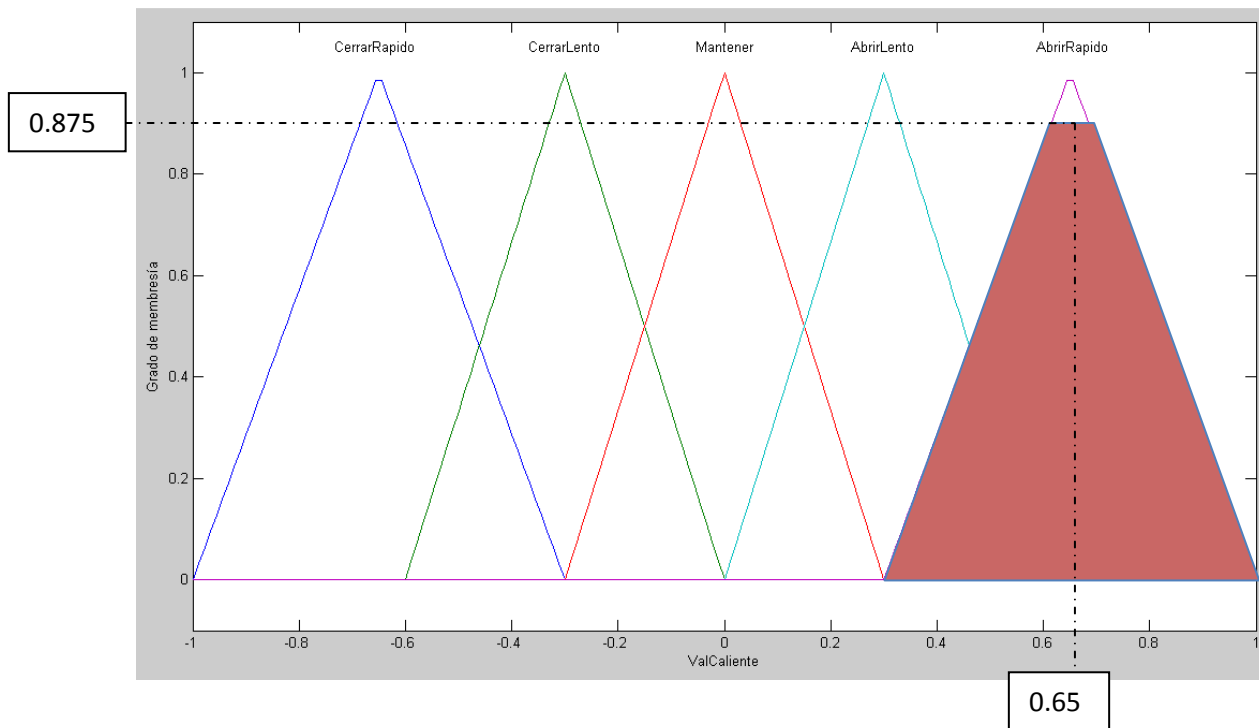


Figura 19.- Defusificación de la variable de salida Vcal Ej.1

$$V_{cal} = \frac{0.65 * 0.875}{0.875} = 0.65$$

Etapla 4.- Aplicación de las acciones de control al proceso.

Temperatura de agua fría= 10

Temperatura de agua caliente=30

Temperatura objetivo= 20

Flujo objetivo=0.7

$$Temp\ salida = \frac{Flujofrío * Temperaturafria + Flujocaliente * Temperaturacaliente}{Flujofrio + Flujocaliente}$$

$$Flujo\ Salida = Flujofrio + Flujocaliente$$

$$Temp\ salida = \frac{0.3 * 10 + 0.65 * 30}{0.3 + 0.65} = 23.68^{\circ}C$$

$$Flujo\ Salida = 0.3 + 0.65 = 0.95 \% \text{ flujo}$$

En la primera acción de control del sistema, el sistema de control lleva el sistema a 23.68°C. Dado que se desean alcanzar 20°C y 0.7 % flujo, existe un error de 3.68°C para el caso de la variable de temperatura. Para el caso de la variable de flujo existe un error de 0.25. Ahora entran al sistema de control 3.68°C para el caso de la temperatura y 0.25 % flujo para el caso de flujo.

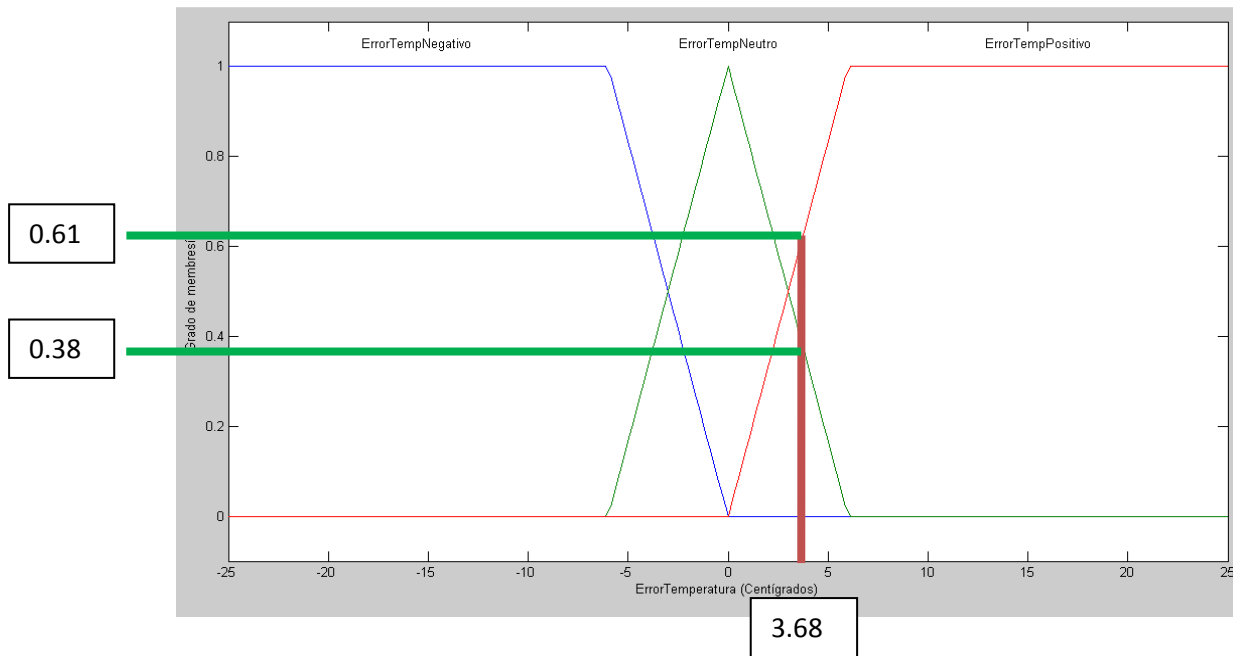


Figura 20.- Funciones de membresía de la variable temperatura Ej.1

Los grados de membresía resultantes son:

$$\mu_{(Negativo)}=0$$

$$\mu_{(Neutro)}=0.3865$$

$$\mu_{(Positivo)}= 0.6133$$

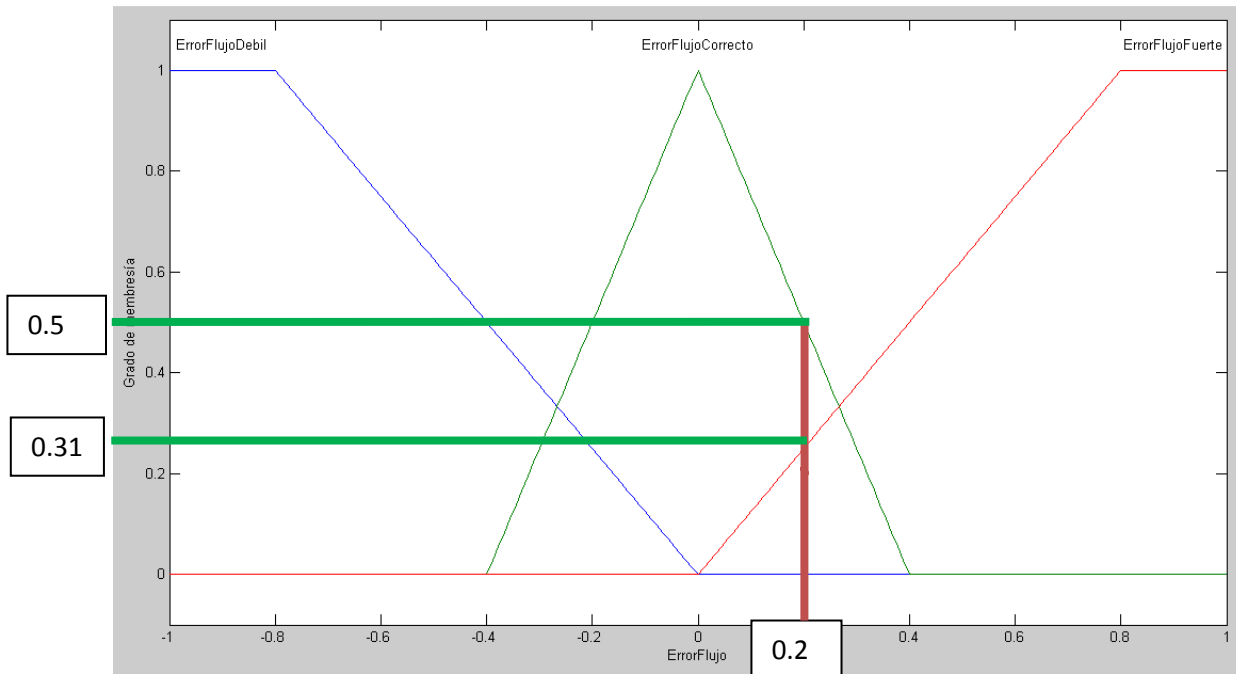


Figura 21.- Funciones de membresía de la variable flujo Ej.1

Los grados de membresía resultantes son:

$$\mu_{\text{(Debil)}} = 0 \qquad \mu_{\text{(Correcto)}} = 0.5 \qquad \mu_{\text{(Fuerte)}} = 0.3125$$

A continuación se procede a la etapa de Inferencia.

Etapa 2.- Inferencia.

En esta etapa se asigna a cada función de membresía el valor numérico que se obtiene de la etapa de fusificación. Una vez que cada una de las funciones de membresía tiene su respectivo valor numérico se evalúan las reglas mediante el operador Min. La aplicación de las reglas de inferencia difusa puede apreciarse en la tabla 8.

CONDICIÓN								→	ACCIÓN						
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ARápido
			0				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	ALento
			0				0.5	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CRápido	y	Vc	→	CLento
			0				0.3125	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ALento
			0.3865				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	Mantener	y	Vc	→	Mantener
			0.3865				0.5	MIN			0.3865				0.3865
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CLento
			0.3865				0.3125	MIN			0.3125				0.3125
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ARápido	y	Vc	→	ALento
			0.6133				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	CLento
			0.6133				0.5	MIN			0.5				0.5
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CRápido
			0.6133				0.3125	MIN			0.3125				0.3125

Tabla 8. Base de reglas de inferencia difusa Ej.1

V Fría					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0	0	0.3865	0	0
		0.3125		0	
		0.3125		0.5	
MAX	0	0.3125	0.3865	0.5	0
V Caliente					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0.3125	0	0.3865	0	0
		0.3125		0	
		0.5		0	
MAX	0.3125	0.5	0.3865	0	0

Tabla 9. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.1



Etapa 3.- Defusificación.

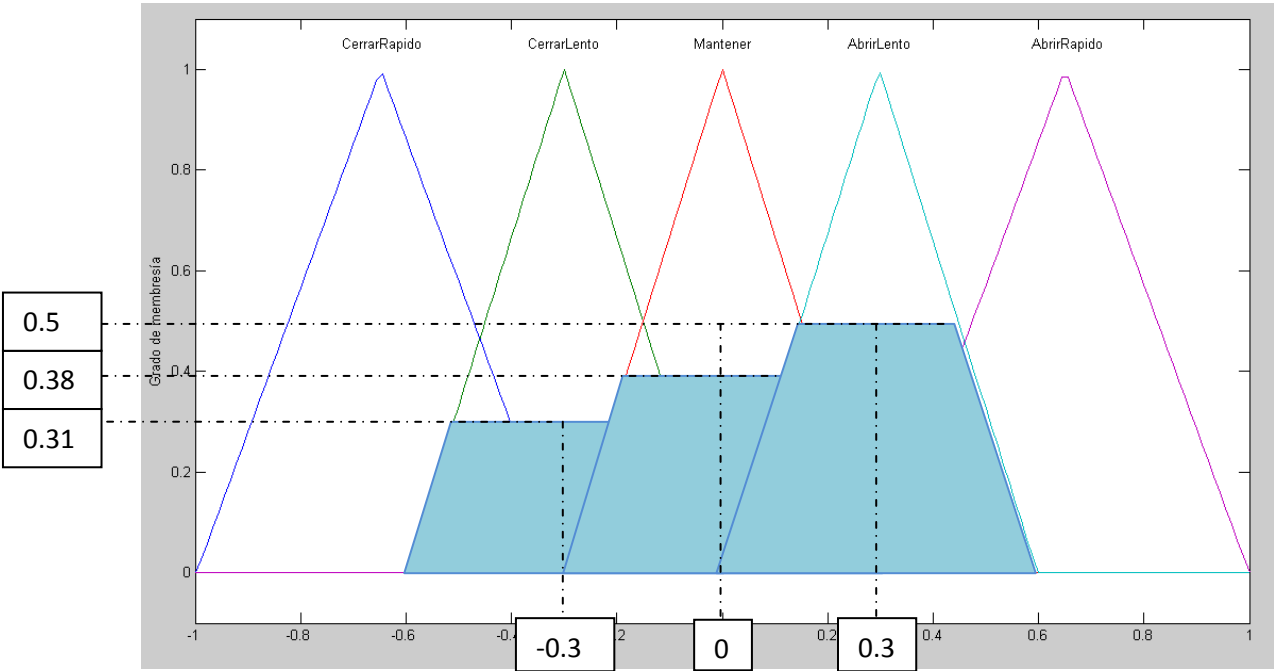


Figura 22.- Defusificación de la variable de salida V fria Ej.1

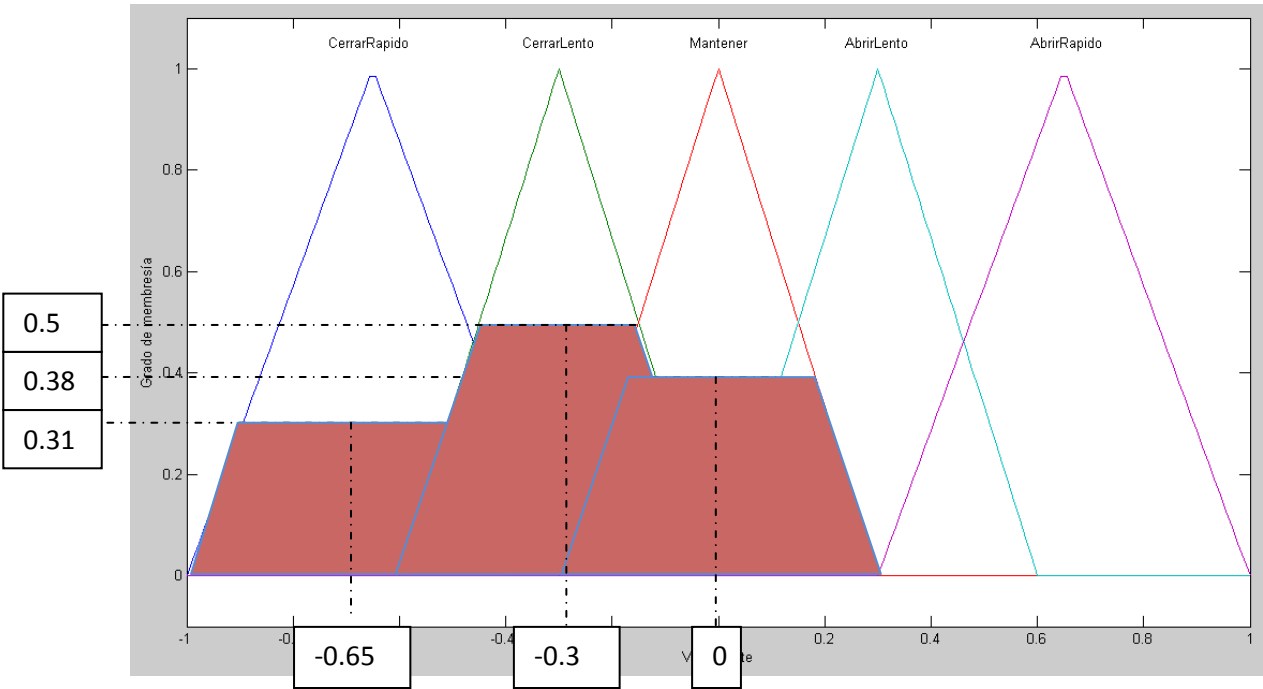


Figura 23.- Defusificación de la variable de salida V cal Ej.1

$$V_{fria} = \frac{(0.3125 * -0.3) + (0.3865 * 0) + (0.5 * 0.3)}{0.3125 + 0.3865 + 0.5} = 0.04691$$

$$V_{cal} = \frac{(0.3125 * -0.65) + (0.5 * -0.3865) + (0.3865 * 0)}{0.3125 + 0.5 + 0.3865} = -0.2945$$

Etapa 4.- Aplicación de las acciones de control

Las nuevas posiciones de las válvulas serán:

Vfria= 0.317

Vcal= 0.3529

Al calcular la acción de control se obtienen las siguientes salidas en el sistema:

$$Temp\ salida = \frac{0.34691 * 10 + 0.3555 * 30}{0.34691 + 0.3555} = 20.12\ ^\circ C$$

$$Flujo\ Salida = 0.34691 + 0.3555 = 0.70241\ \% \text{ flujo}$$

Con la nueva acción de control, el error de temperatura se ha reducido de 3.68 °C a 0.12 °C.

Para el caso de flujo el error de flujo se ha reducido de 0.25 % flujo a -0.00241 % flujo.

### 3.8 Ejemplo 2.

El sistema ya se encuentra operando y se ha logrado estabilizar a 20°C y a 0.5 % flujo (Vfria=0.25 y Vcal=0.25) en su salida de temperatura y flujo respectivos. En un determinado momento el usuario desea aumentar tanto la temperatura como flujo de salida a 25°C y 0.7 % flujo respectivamente.

## Etapa 1. Fusificación

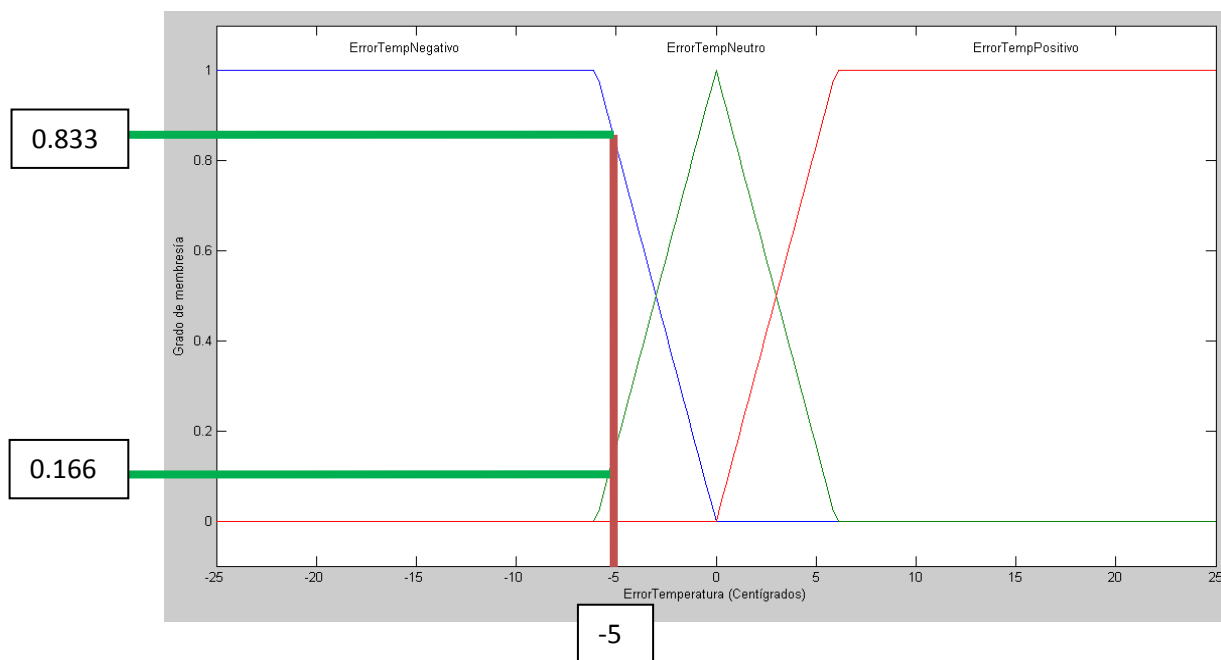


Figura 24.- Funciones de membresía de la variable temperatura Ej.2

$$\mu_{\text{(Negativo)}}=0.833$$

$$\mu_{\text{(Neutro)}}=0.1666$$

$$\mu_{\text{(Positivo)}}=0$$

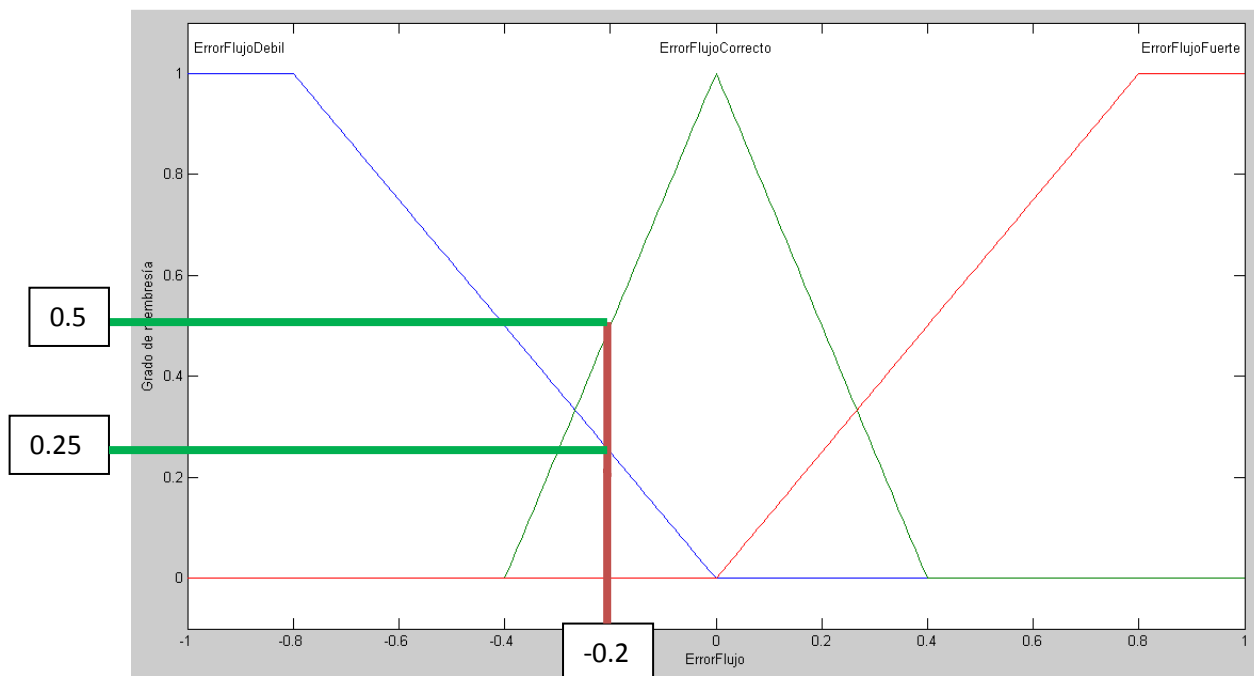


Figura 25.- Funciones de membresía de la variable flujo Ej.2

$$\mu_{\text{(débil)}}=0.25$$

$$\mu_{\text{(correcto)}}=0.5$$

$$\mu_{\text{(fuerte)}}=0$$

## 2.- Aplicación de la base de reglas de Inferencia difusa

CONDICIÓN								→	ACCIÓN						
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ARápido
			0.833				0.25	MIN			0.25				0.25
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	ALento
			0.833				0.5	MIN			0.5				0.5
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CRápido	y	Vc	→	CLento
			0.833				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ALento
			0.1666				0.25	MIN			0.1666				0.1666
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	Mantener	y	Vc	→	Mantener
			0.1666				0.5	MIN			0.1666				0.1666
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CLento
			0.1666				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ARápido	y	Vc	→	ALento
			0				0.25	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	CLento
			0				0.5	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CRápido
			0				0	MIN			0				0

Tabla 10. Aplicación de la Base de Reglas del Sistema de Control Difuso Ej.2

V Fría					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0	0.5	0.1666	0.25	0
		0		0.1666	
MAX	0	0.5	0.1666	0.25	0
V Caliente					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0	0	0.1666	0.5	0.25
		0		0.1666	
MAX	0	0	0.1666	0.5	0.25

Tabla 11. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.2

### Etapas 3.- Defusificación

En esta etapa se obtendrá un valor numérico que representa a los conjuntos difusos generados por la aplicación de las reglas de inferencia difusa. Para obtener un valor representativo de los conjuntos difusos generados se utiliza el método de la media ponderada como puede observarse a continuación.

Para Vfria:

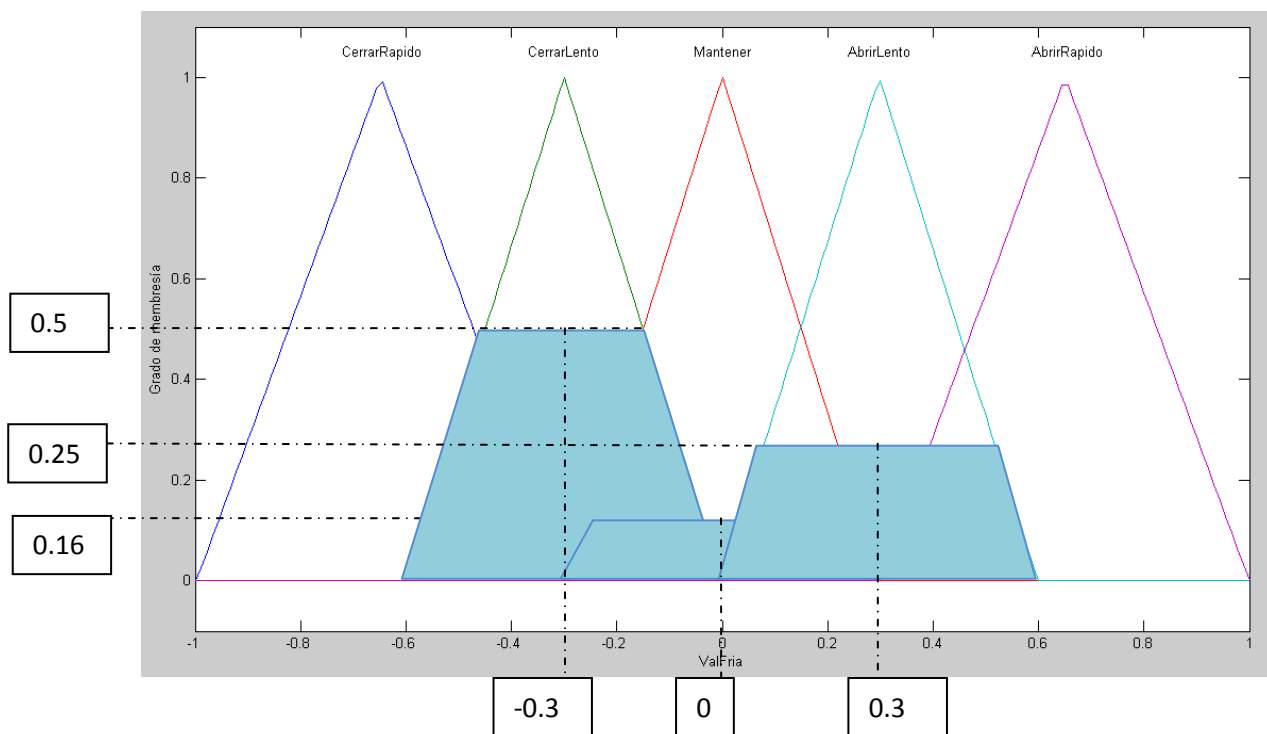


Figura 26.- Defusificación de la variable de salida Vfria Ej.2

Aplicando el método de la media ponderada, se obtiene el valor defusificado.

$$V_{fria} = \frac{(0.5 * -0.3) + (0.1666 * 0) + (0.25 * 3)}{0.5 + 0.25 + 0.16} = -0.0818$$

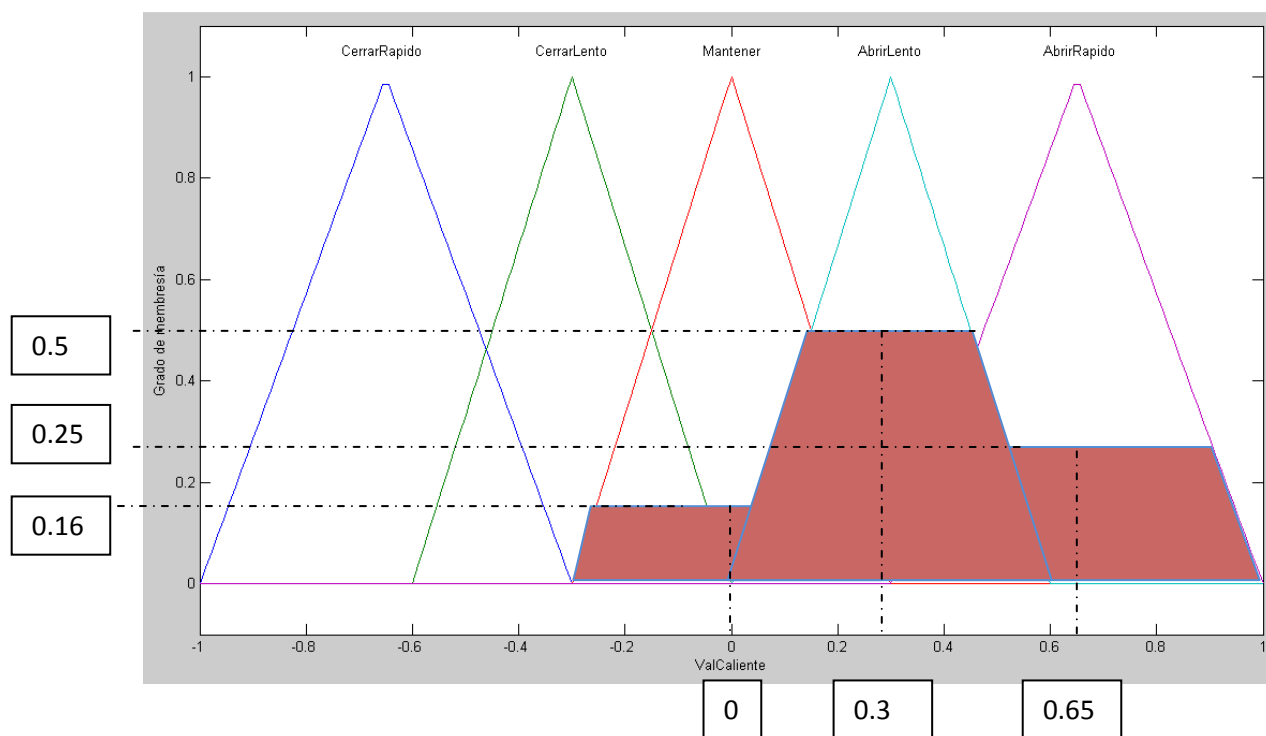


Figura 27.- Defusificación de la variable de salida Vcal Ej.2

$$V_{cal} = \frac{(0.166 * 0) + (0.5 * 0.3) + (0.25 * 0.65)}{0.1666 + 0.5 + 0.25} = 0.34093$$

Etapla 4.- Aplicación de las acciones de control

Las nuevas posiciones de las válvulas serán:

Vfria= 0.1682

Vcaliente= 0.5909

$$Temp\ salida = \frac{0.1682 * 10 + 0.5909 * 30}{0.1682 + 0.5909} = 25.56\text{ }^{\circ}\text{C}$$

$$Flujo\ Salida = 0.1682 + 0.5909 = 0.7591\text{ l/s}$$

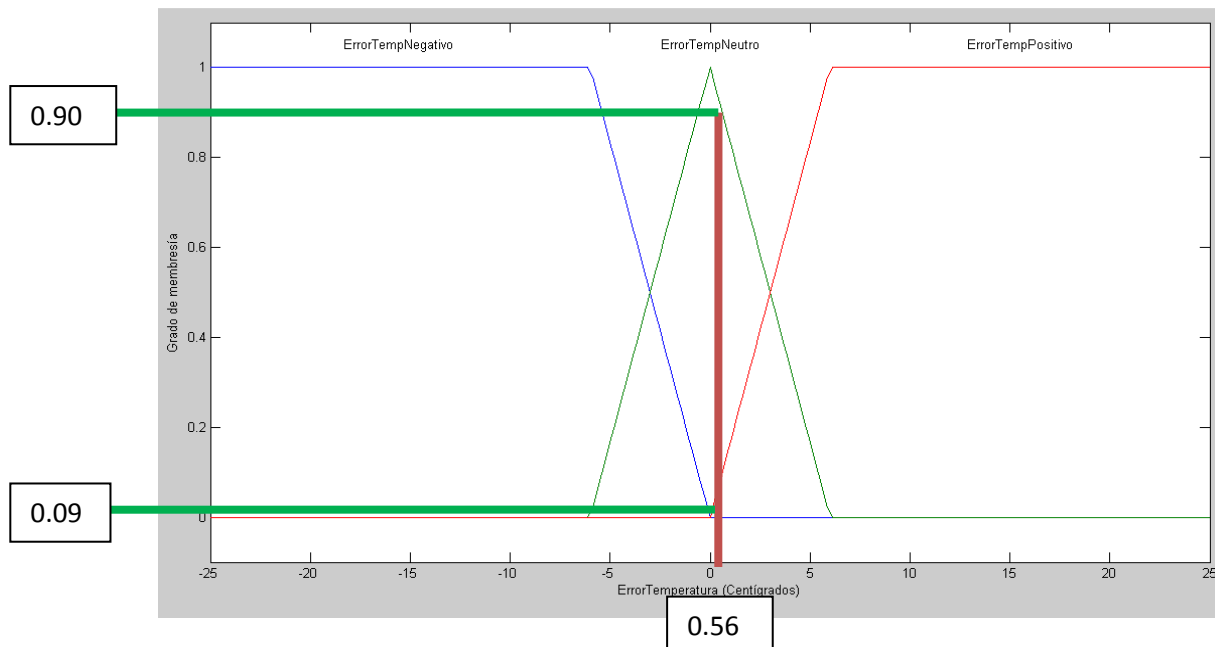


Figura 28.- Funciones de membresía de la variable temperatura Ej.2

$$\mu(\text{Negativo}) = 0$$

$$\mu(\text{Neutro}) = 0.9063$$

$$\mu(\text{Positivo}) = 0.0933$$

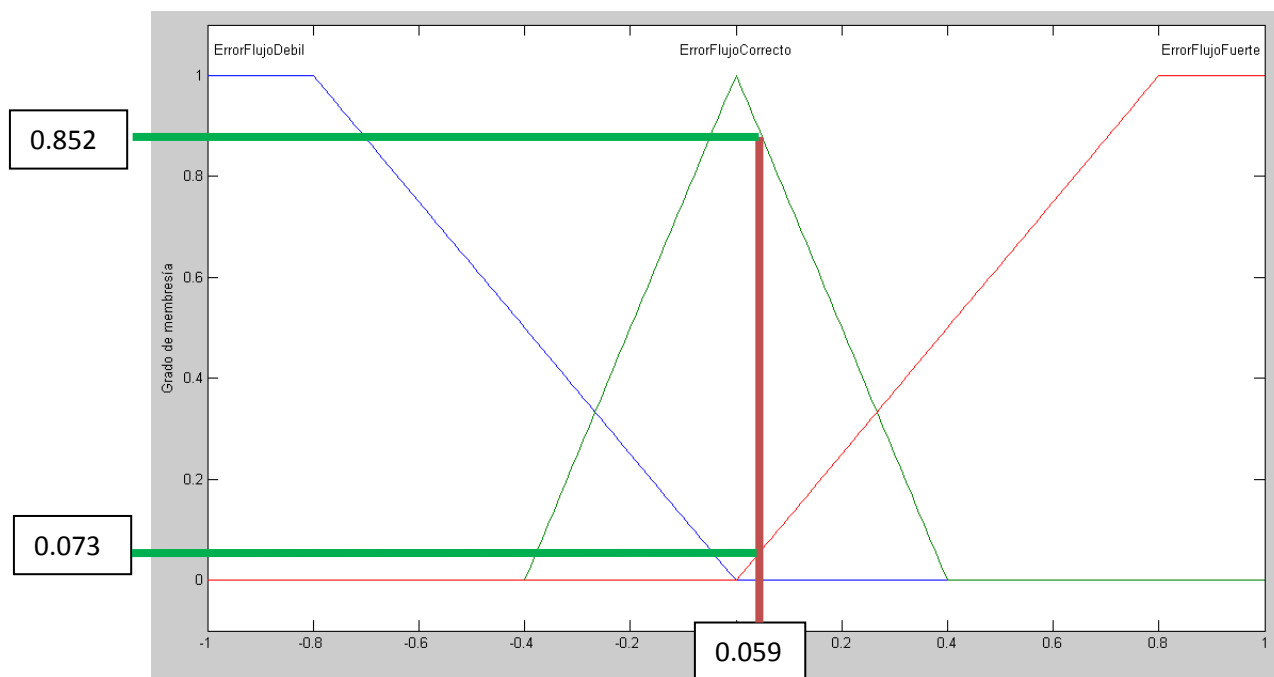


Figura 29.- Funciones de membresía de la variable flujo Ej.2

$$\mu(\text{Debil}) = 0$$

$$\mu(\text{Correcto}) = 0.8525$$

$$\mu(\text{Fuerte}) = 0.0737$$

## Etapa 2.- Base de reglas de inferencia difusa

CONDICIÓN								→	ACCIÓN						
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ARápido
			0				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	ALento
			0				0.8525	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Negativo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CRápido	y	Vc	→	CLento
			0				0.0737	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	ALento
			0.9063				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	Mantener	y	Vc	→	Mantener
			0.9063				0.8525	MIN			0.8525				0.8525
Si	ErrTemp	es	Neutro	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CLento
			0.9063				0.0737	MIN			0.0737				0.0737
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Debil	entonces	Vf	→	ARápido	y	Vc	→	ALento
			0.0933				0	MIN			0				0
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Correcto	entonces	Vf	→	ALento	y	Vc	→	CLento
			0.0933				0.8525	MIN			0.0933				0.0933
Si	ErrTemp	es	Positivo	y	ErrFlujo	es	Fuerte	entonces	Vf	→	CLento	y	Vc	→	CRápido
			0.0933				0.0737	MIN			0.0737				0.0737

Tabla 12. Aplicación de la Base de Reglas del Sistema de Control Difuso Ej.2

V Fría					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0	0	0.8525	0	0
		0.0737		0	
		0.0737		0.0933	
MAX	0	0.0737	0.8525	0.0933	0
V Caliente					
	CRápido	CLento	Mantener	ALento	ARápido
	0.0737	0	0.8525	0	0
		0.0737		0	
		0.0933		0	
MAX	0.0737	0.0933	0.8525	0	0

Tabla 13. Aplicación del operador Max en la inferencia Ej.2



### Etapa 3.- Defusificación.

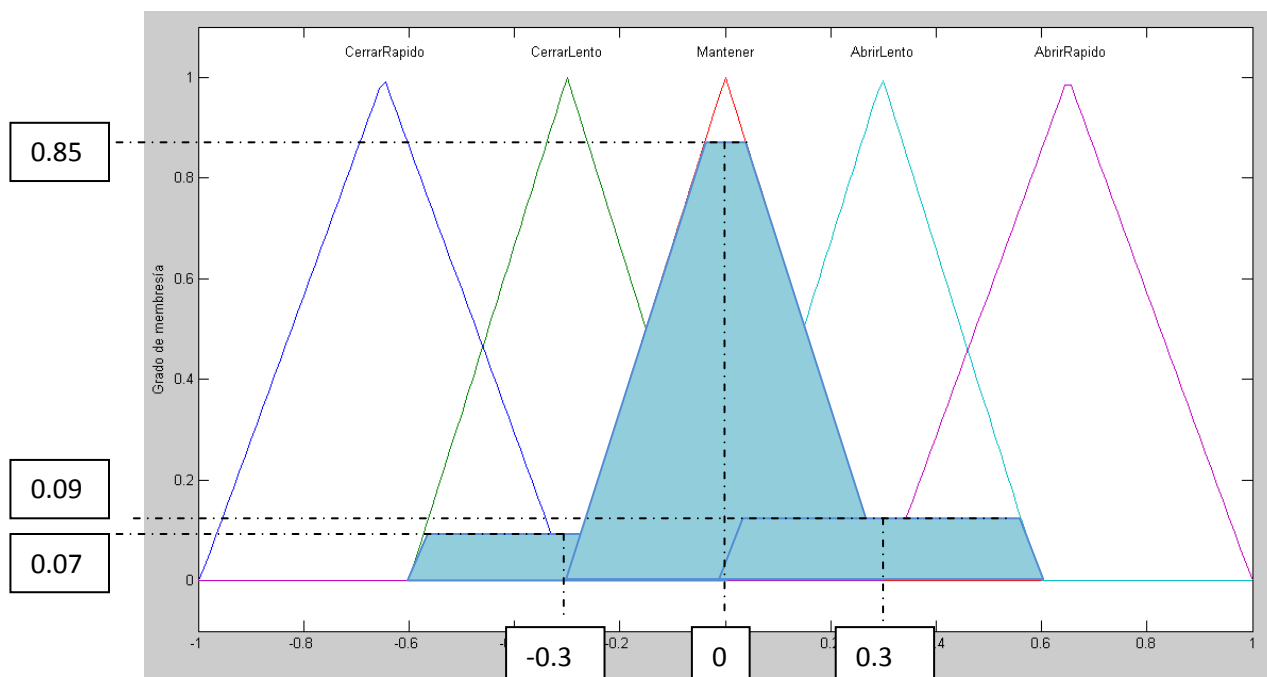


Figura 30.- Defusificación de la variable de salida  $V_{\text{fria}}$  Ej.2

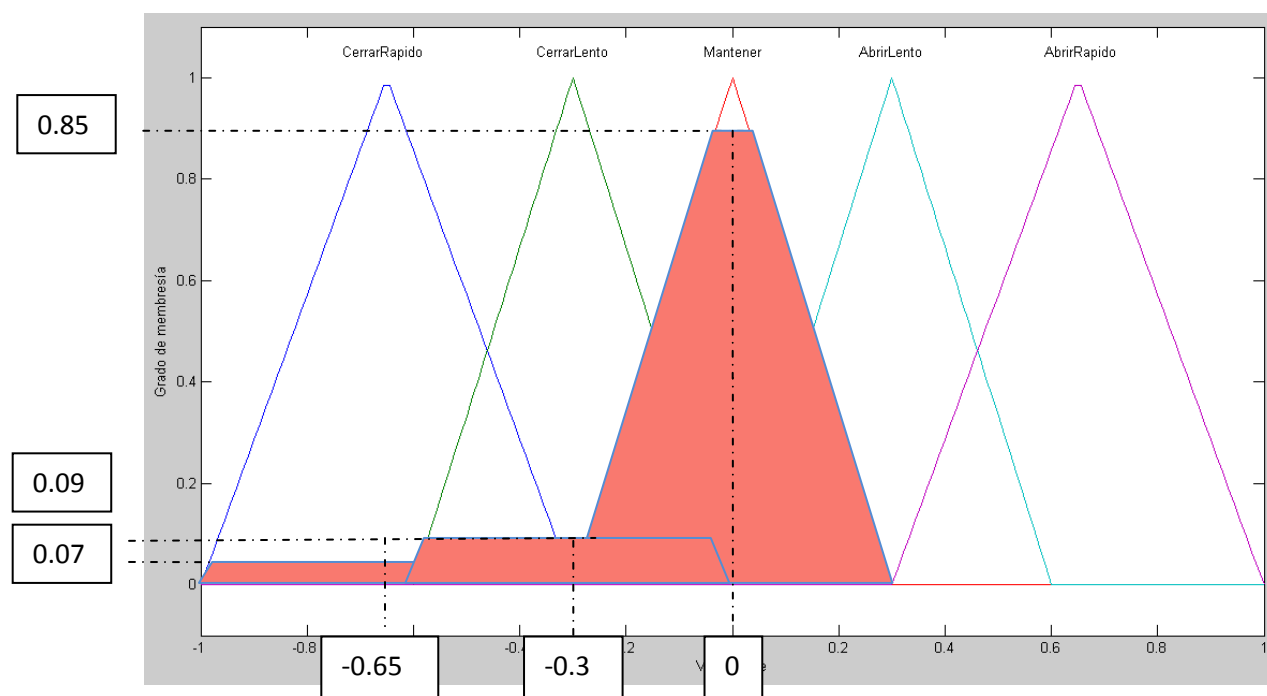


Figura 31.- Defusificación de la variable de salida  $V_{\text{cal}}$  Ej.2

Se aplica el método de defusificación media ponderada.

$$V_{fria} = \frac{(0.0737 * -0.3) + (0.8525 * 0) + (0.0933 * 3)}{0.0737 + 0.8525 + 0.0933} = 0.0057$$

$$V_{cal} = \frac{(0.0737 * -0.6) + (0.0933 * -0.3) + (0.8525 * 0)}{0.0737 + 0.0933 + 0.8525} = -0.0744$$

Etapla 4.- Aplicación de las acciones de control

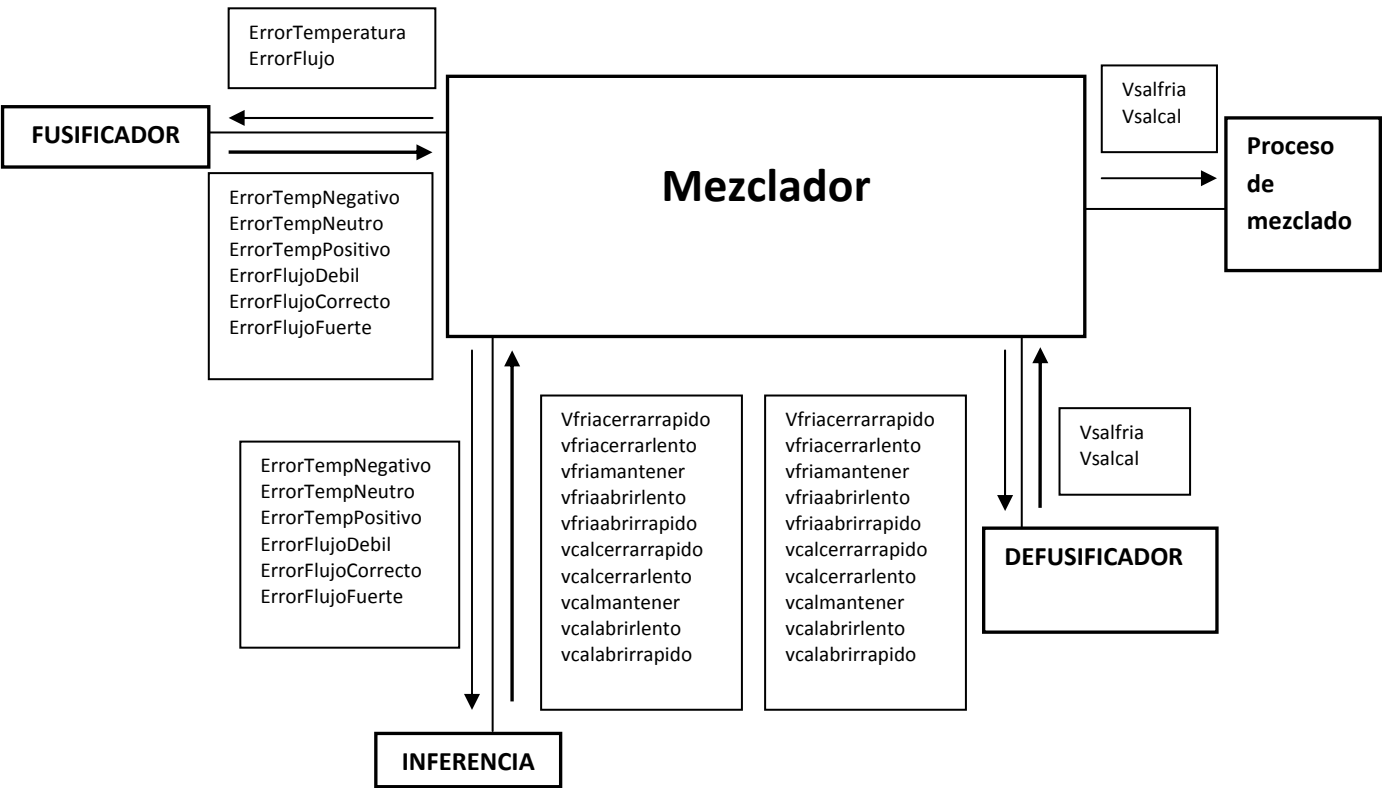
Las nuevas posiciones de las válvulas serán:

Vfria= 0.1782 y Vcal= 0.5165

$$Temp\ salida = \frac{0.1782 * 10 + 0.5165 * 30}{0.1782 + 0.5165} = 24.86\text{ }^{\circ}C$$

$$Flujo\ Salida = 0.1782 + 0.5165 = 0.6947\text{ l/s}$$

3.9 Arquitectura del Sistema de mezclado



Función		Defusificador
Entradas: vfcerap, vfcelen, vfmant, vccerap, vccelen, vcmant, vcablen, vcabrap		
Salida: VsF, VsC		
Descripción: La salida difusa que proviene del mecanismo de inferencia es la entrada de esta función. En la función defusificador se convierte la salida difusa en una salida numérica que pueda ser interpretada por elementos de control que procesen información numérica. El método de Defusificación utilizado es el método de la media ponderada		
Pseudocódigo:		
Inicio]		
$VsF = \frac{(vfcerap \cdot Cvferap) + (vfcelen \cdot Cvfcelen) + (vfmant \cdot Cvfmant) + (vfablen \cdot Cvfablen) + (vfabrap \cdot Cvfabrap)}{(vfcerap + vfcelen + vfmant + vfablen + vfabrap)}$		
$VsC = \frac{(vccerap \cdot Cvccerap) + (vccelen \cdot Cvccelen) + (vcmant \cdot Cvcmant) + (vcablen \cdot Cvcablen) + (vcabrap \cdot Cvcabrap)}{(vccerap + vccelen + vcmant + vcablen + vcabrap)}$		
[Fin]		

Función:	Fusificador ( )
Entradas: ErrorTemp,ErrorFlujo Salidas: ErrTempNeg, ErrTempNeu, ErrTempPos,ErrFluDeb,ErrFluCorr,ErrFluFuer	
Descripción: Esta función calcula los grados de membresía de las funciones de error de temperatura y error de flujo.	
Pseudocódigo:  [Inicio] Si (ErrorTemp<=1) entonces ErrTempNeg=1 si_no: Si (ErrorTemp<-6 y ErrorTemp<=0) entonces ErrTempNeg=-(ErrorTemp/6)  Si (ErrorTemp>-6 y ErrorTemp<=0) entonces ErrTempNeu=((0.16)*(ErrorTemp+6)) si_no: Si (ErrorTemp>0 y ErrorTemp<=6 ) entonces ErrTempNeu=((0.16)*(-ErrorTemp+6)) Si (ErrorTemp>=6) entonces ErrTempPos=1 si_no: Si (ErrorTemp>0 y ErrorTemp<6) entonces ErrTempPos=ErrorTemp/6  Si (ErrorFlujo<=-0.8) entonces ErrFluDeb=1 si_no: Si (ErrorFlujo>-0.8 y ErrorFlujo<=0) entonces ErrFluDeb=-(ErrorFlujo/0.8)  Si (ErrorFlujo>=-0.4 y ErrorFlujo<=0) entonces ErrFluCorr=(2.5*(ErrorFlujo+0.4)) si_no: Si (ErrorFlujo>0 y ErrorFlujo<=0.4) entonces ErrFluCorr=(2.5*(-ErrorFlujo+0.4))  Si (ErrorFlujo>=0.8) entonces ErrFluFuer=1 si_no: Si (ErrorFlujo>0 y ErrorFlujo<0.8) entonces ErrFluFuer=ErrorFlujo/0.8  [Fin]	

<b>Función</b>	<b>Inferencia</b>
Entradas: ErrTempNeg, ErrTempNeu, ErrTempPos, ErrFlujoDeb, ErrFlujoCorr, ErrFlujoFue	
Salidas: vfriacerrarrapido, vfriacerrarlento, vfriamantener, vfriaabrir lento, vfriaabrirrapido, vcalcerrarrapido, vcalcerrarlento, vcalmantener, vcalabrir lento, vcalabrirrapido	
Descripción:	Esta función toma como entrada los grados de membresía del fusificador. Los grados de membresía se procesan para generar una salida difusa. El procesamiento de los grados de membresía se hace a través de la base de reglas y los operadores Max-Min.
Pseudocódigo:	
[Inicio]	
ablenvfria1	= Mínimo (ErrorTempNegativo, ErrorFlujoDebil);
abrapvcal1	= Mínimo (ErrorTempNegativo, ErrorFlujoDebil);
celenvfria2	= Mínimo (ErrorTempNegativo, ErrorFlujoCorrecto);
ablenvcal2	= Mínimo (ErrorTempNegativo, ErrorFlujoCorrecto);
cerapvfria3	= Mínimo (ErrorTempNegativo, ErrorFlujoFuerte);
cerlenvcal3	= Mínimo (ErrorTempNegativo, ErrorFlujoFuerte);
ablenvfria4	= Mínimo (ErrorTempNeutro, ErrorFlujoDebil);
ablenvcal4	= Mínimo (ErrorTempNeutro, ErrorFlujoDebil);
mantvfria5	= Mínimo (ErrorTempNeutro, ErrorFlujoCorrecto);
mantvcal5	= Mínimo (ErrorTempNeutro, ErrorFlujoCorrecto);
celenvfria6	= Mínimo (ErrorTempNeutro, ErrorFlujoFuerte);
celenvcal6	= Mínimo (ErrorTempNeutro, ErrorFlujoFuerte);
abrapvfria7	= Mínimo (ErrorTempPositivo, ErrorFlujoDebil);
ablenvcal7	= Mínimo (ErrorTempPositivo, ErrorFlujoDebil);
ablenvfria8	= Mínimo (ErrorTempPositivo, ErrorFlujoCorrecto);
celenvcal8	= Mínimo (ErrorTempPositivo, ErrorFlujoCorrecto);
celenvfria9	= Mínimo (ErrorTempPositivo, ErrorFlujoFuerte);
cerapvcal9	= Mínimo (ErrorTempPositivo, ErrorFlujoFuerte);
vfcerrap	= cerapvfria3;
vfcerlen1	= Máximo (celenvf2, celenvf6);
vfcerlen	= Máximo (vfcelen1, celenvf9);
vmant	= mantvf5;
vfablen1	= Máximo (ablenvf1, ablenvf4);
vfablen	= Máximo (vfablen1, ablenvf8);
vfabrap	= abrapvf7;
vccerrap	= cerapvc9;
vccele1	= Máximo (celenvc3, celenvc6);
vccele	= Máximo (vccerlen1, cerlenvc8);
vcmant	= mantvc5;
vcablen1	= Máximo (ablenvc2, ablenvc4);
vcablen	= Máximo (vcablen1, ablenvc7);
vcabrap	= abrapvc1;
[Fin]	

### 3.10 Resumen

En este capítulo se ha presentado el diseño del controlador difuso. Se comenzó por definir el rango del controlador mediante la selección de las temperaturas adecuadas que los seres humanos pueden soportar de acuerdo a estudios realizados sobre la temperatura y el confort en el ser humanos. El rango de confort de temperatura para los seres humanos oscila entre los 22°C y 28°C, siendo los 25°C la temperatura ideal para el ser humano. Se definieron las funciones difusas: temperatura de confort, fría y caliente. También se definieron las funciones difusas para el error de temperatura: Negativo, Neutro y Positivo; y para el error de flujo: Débil, Correcto y Fuerte.

Se definieron 9 reglas de inferencia difusa que reflejan las acciones de control del sistema.

Se presenta un algoritmo de control del mezclado que aplica las reglas de inferencia sobre el valor de entrada correspondiente.

## **Capítulo 4**

## **RESULTADOS**

### **4.1 Simulación del sistema de mezclado de agua en Labview**

Para poder visualizar de manera gráfica la respuesta del sistema en el dominio del tiempo, se ha diseñado una interface de simulación gráfica en el entorno Labview, en ella se puede modificar las variables de entrada, como lo son las temperatura y flujos de entrada al sistema

de mezclado. Este comportamiento se puede visualizar en la interfaz mediante el instrumento virtual “Temperatura de Salida”.

En la interface es posible visualizar tanto el flujo caliente como el flujo frio requeridos para obtener la temperatura deseada. Esto ayuda a entender la aportación que existe de las variables de flujo en la formación de la variable de temperatura de salida del sistema. En el ambiente de programación Labview, se ha implementado la ecuación 14 que describe en el tiempo la temperatura de mezclado. La programación mediante bloques se puede observar en la figura 32:

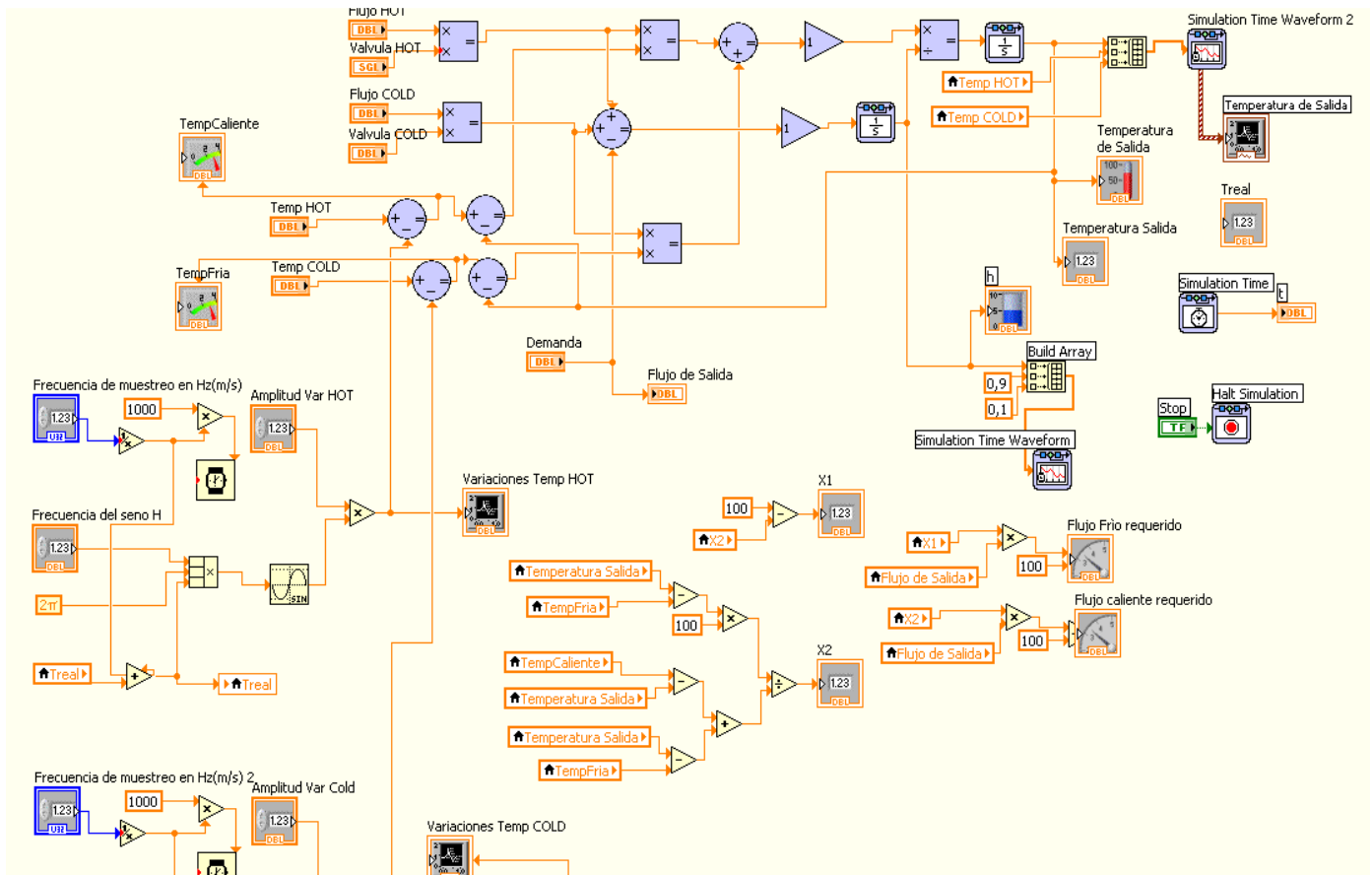


Figura 32.- Diagrama de bloques de la ecuación de temperatura en Labview



El panel frontal del programa desarrollado mediante Labview se puede observar en la figura 33.

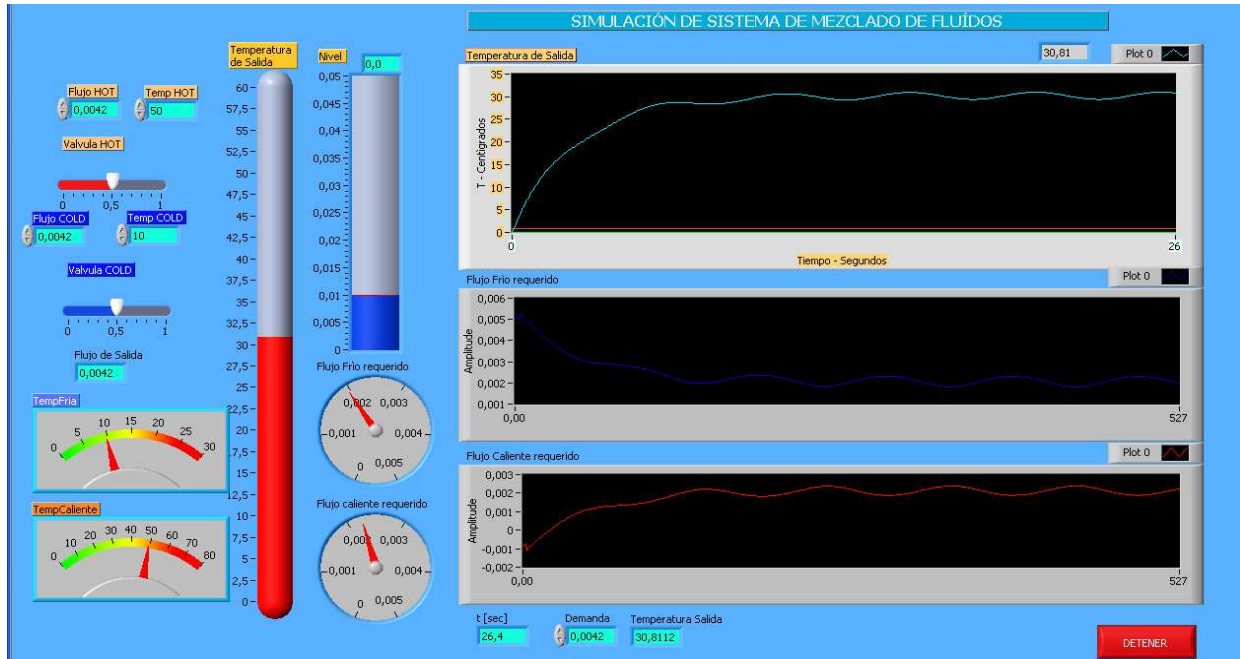


Figura 33.- Interface de simulación para el sistema de mezclado de agua

Como puede observarse en la figura 33, puede ingresarse el valor numérico de flujo caliente, flujo frío, la temperatura de agua fría y la temperatura de agua caliente, para de esta manera conocer la respuesta del sistema en tiempo real. Una función importante de esta interface gráfica, es que pueden ser modificadas las variables de entrada al sistema de mezclado en cualquier momento, tal y como se podría ejemplificar una caída de presión por la tubería en el sistema real de mezclado, lo que haría disminuir el flujo de salida del sistema, de tal manera que puede observarse la dinámica del sistema bajo distintas condiciones de operación.

De la misma manera, las temperaturas de entradas al sistema pueden ser modificadas, de tal manera que se puede incrementar o disminuir la temperatura, tal y como podría

ejemplificarse el efecto de las variaciones de temperatura que existen en un sistema de calentamiento físico. Como ejemplo se presentan algunos casos de análisis al sistema, en el primer caso se presenta un incremento de 10 °C en la temperatura caliente, mientras las demás variables de entrada permanecen constantes.

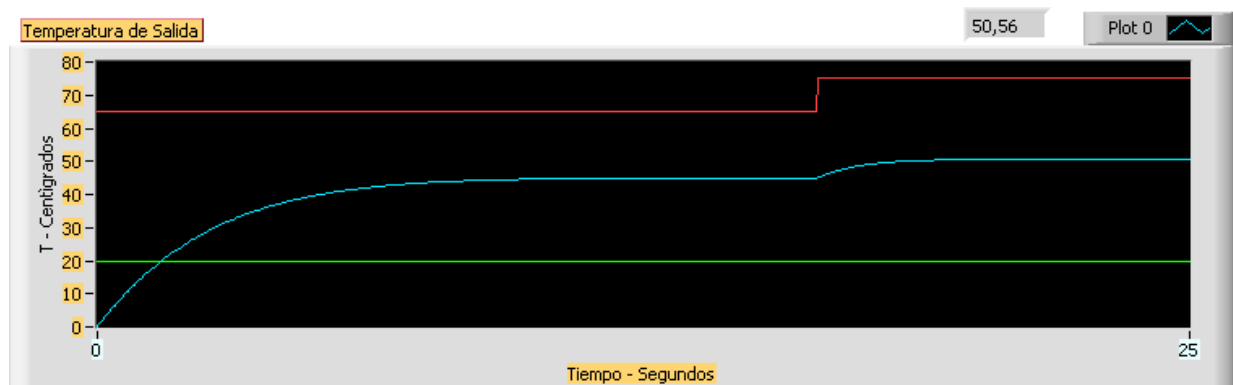


Figura 34. Simulación de la respuesta ante una perturbación de 10 °C

Como puede observarse en la figura 34, con un incremento en la temperatura de entrada de flujo caliente, la temperatura de salida del sistema también se incrementa. Un segundo ejemplo de las simulaciones realizadas se presenta a continuación. En un instante la temperatura Fría sube de 20 °C a 30°C, el Flujo Frío sube de 0.0042 m<sup>3</sup>/s a 0.0052 m<sup>3</sup>/s y el Flujo Caliente baja de 0.0042 m<sup>3</sup>/s a 0.0032 m<sup>3</sup>/s.

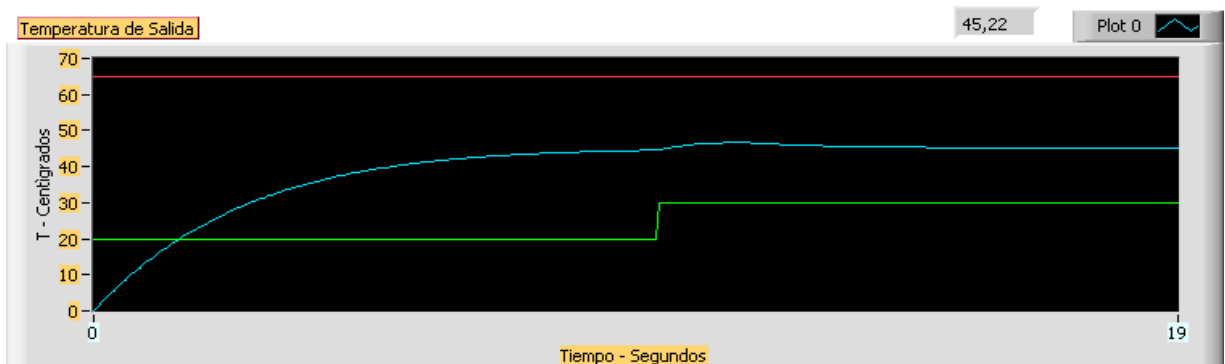


Figura 35. Simulación de la respuesta del sistema ante una perturbación

A pesar de los cambios en la temperatura fría y en los flujos de entrada, la temperatura de salida del sistema tuvo una ligera subida dado que el aporte de calor es mayor dentro del sistema, lo que hace subir la temperatura en el mismo.

## 4.2 Simulación por Elemento Finito Fluent–Ansys

El objetivo de este análisis es validar las ecuaciones que modelan el sistema de mezclado, tanto para la temperatura de mezclado como para el flujo de mezclado mediante otro método, en este caso el método del elemento finito. Se desea conocer la distribución de las temperaturas dentro de la tubería de mezclado, ya que la operación de mezclado se lleva a cabo en una tubería del tipo T. Se requiere determinar la distancia mínima requerida para que se alcance una temperatura homogénea a la salida del sistema mezclado de agua y poder asegurar que el mezclado se lleva a cabo de manera satisfactoria con la configuración en forma de T, tal y como se puede apreciar en la figura 36.

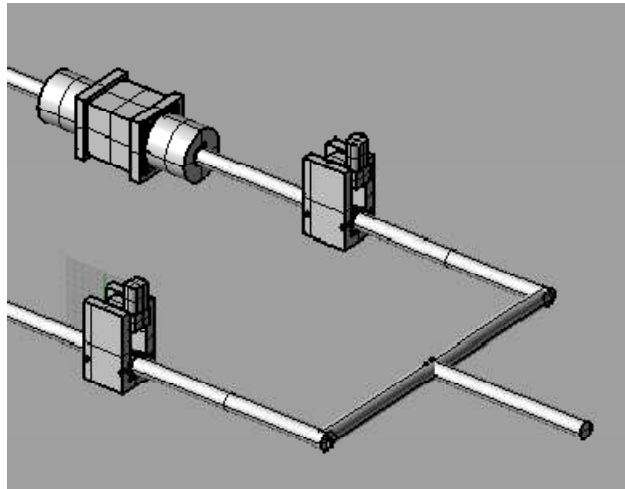


Figura 36. Configuración tipo T para el mezclado en el sistema de tuberías propuesto.

En esta simulación se puede simular de manera numérica y visual el proceso de mezclado interno que existe en la tubería, el mezclado del agua se genera por el choque de las moléculas del agua caliente y fría. Esta simulación aporta información útil para el desarrollo físico del sistema mezclado, ya que nos permite conocer la longitud mínima que se necesita para que el sistema se mezcle de manera uniforme a la salida del sistema. Los parámetros de la simulación son los siguientes y están referidos al agua.

Densidad	1000 kg/m <sup>3</sup>
Calor específico	4216 J/kg-K
Conductividad térmica	0.677 W/m-K
Viscosidad	8x10 <sup>-4</sup> kg=m-s
Flujo Caliente	0.4 % flujo
Temperatura Caliente	333.1 K (60 C )
Flujo Frío	0.4 % flujo
Temperatura Fría	293.1 K (20 C )

Tabla 14.- Parámetro de la simulación por elemento finito

Los resultados de la simulación pueden apreciarse en la figura 37.

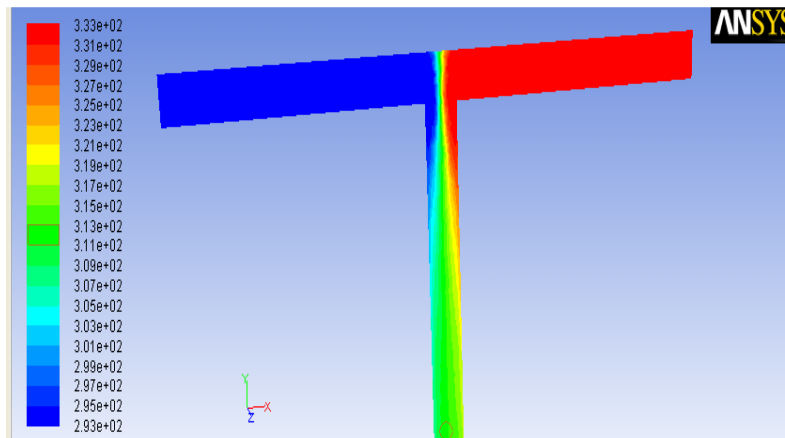


Figura 37: Simulación por elemento finito del sistema propuesto

Como puede observarse en la figura 37, se logra validar el modelo matemático descrito mediante el método de análisis finito, con lo que se corrobora que la temperatura de salida se alcanza con las mismas condiciones de entrada que en la simulación descrita en el lenguaje C++ y en Labview, lo que representa que el modelo matemático describe correctamente al sistema.

En este punto de la tubería, la temperatura es de 312 K (38.9 °C). Este punto se encuentra a 10 cm del punto de inicio de mezclado. Se observa que la temperatura final que se logra, es la misma que se obtiene de simular el sistema bajo el sistema de ecuaciones descrito durante el modelado.

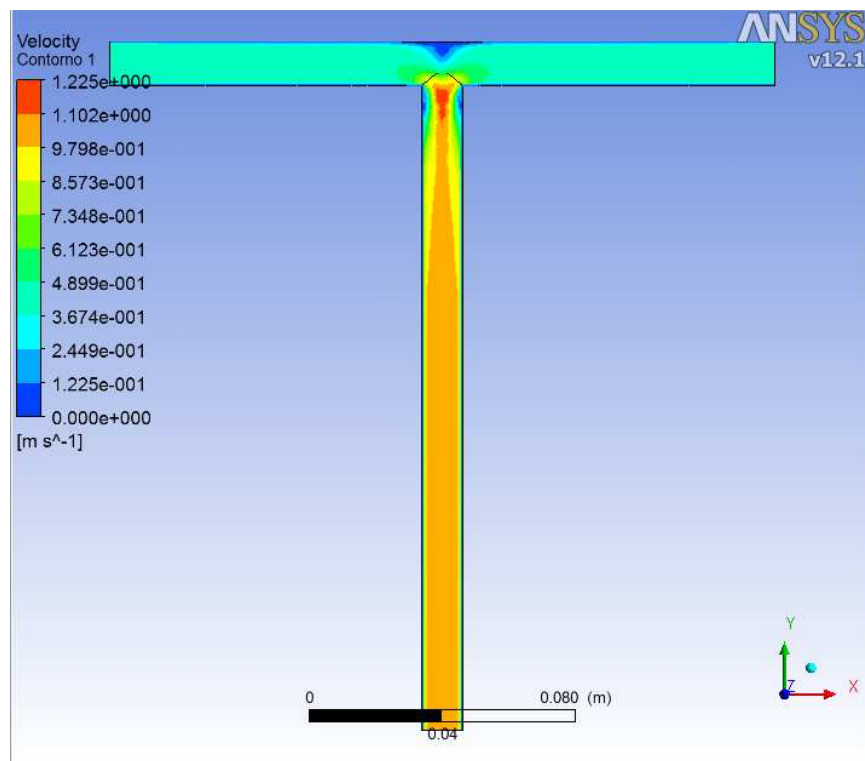


Figura 38.- Velocidad del flujo en el sistema

La figura 38 muestra la distribución de la velocidad de flujo del sistema. Se concluye que es necesario el tener al menos una longitud de tubería de 10 cm para el desarrollo del

mezclado, esto con la finalidad de que el flujo se mezcle totalmente y se logre tener la temperatura uniforme a la salida del sistema.

Para la implementación física se recomienda, el permitir que el mezclado se realice en una tubería de ½ pulgada de al menos 10 centímetros de longitud, esto con la finalidad de lograr una temperatura homogénea a la salida del sistema de mezclado de agua.

### 4.3 Control PID

Para conocer la respuesta que este tipo de sistema de mezclado tiene con un controlador clásico tipo PID, se ha diseñado en el ambiente de programación Matlab, un simulador que engloba un controlador PID regulando el modelo del sistema de mezclado utilizado.

La respuesta que se obtenga con este tipo de controlador será comparada con el controlador Difuso diseñado en este trabajo. Por la naturaleza del controlador PID, se espera que la respuesta presente un sobretiro considerable y una respuesta de tipo amortiguada. Dado que se trata de un sistema multivariable, es necesario un controlador PID para cada una de las variables que se desean controlar, de tal manera que existe un controlador PID para controlar la temperatura deseada y existe un controlador PID para el flujo deseado.

Las ecuaciones 1 y 2 reflejan que el sistema está representado por un modelo no lineal. Si se desea que un controlador clásico tipo PID pueda regular el sistema, es necesario linealizar dicho modelo. La forma en que se linealiza este modelo no lineal es mediante la aplicación de series de Taylor para funciones multivariantes de la siguiente forma:

$$F(x, y, z) \approx F(x_0, y_0, z_0) + \frac{\partial F(x_0, y_0, z_0)}{\partial x}(x - x_0) + \frac{\partial F(x_0, y_0, z_0)}{\partial y}(y - y_0) + \frac{\partial F(x_0, y_0, z_0)}{\partial z}(z - z_0) \quad (17)$$

Aplicando dicho concepto a las ecuaciones se tiene:

$$F_{cal}(T_{cal} - T) \frac{1}{AL} \approx \frac{F_{cal}(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0} + \frac{(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0} \Delta F_1 - \frac{F_{cal}(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0^2} \Delta L - \frac{F_{cal} T_{sal}}{AL_0} \Delta T \quad (18)$$

$$F_{frio}(T_{fria} - T) \frac{1}{AL} \approx \frac{F_{frio}(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0} + \frac{(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0} \Delta F_2 - \frac{F_{frio}(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0^2} \Delta L - \frac{F_{frio} T_{sal}}{AL_0} \Delta T \quad (19)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(T_{sal} \Delta T)}{dt} = & \frac{F_{cal}(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0} + \frac{(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0} \Delta F_1 - \frac{F_{cal}(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0^2} \Delta L - \frac{F_{cal} T_{sal}}{AL_0} \Delta T + \frac{F_{frio}(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0} \\ & + \frac{(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0} \Delta F_2 - \frac{F_{frio}(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0^2} \Delta L - \frac{F_{frio} T_{sal}}{AL_0} \Delta T \end{aligned} \quad (20)$$

$$\begin{aligned} \frac{d(\Delta T)}{dt} = & \frac{(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0} \Delta F_1 - \frac{F_{cal}(T_{cal} - T_{sal})}{AL_0^2} \Delta L - \frac{F_{cal} T_{sal}}{AL_0} \Delta T + \frac{(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0} \Delta F_2 - \frac{F_{cal}(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0^2} \Delta L \\ & - \frac{F_{frio} T_{sal}}{AL_0} \Delta T \end{aligned} \quad (21)$$

En forma de espacio de estados, tenemos

$$\begin{aligned} \Delta \dot{T} = & \left[ -\frac{F_{cal} + F_{frio}}{AL_0} - \frac{F_{cal}(T_{cal} - T_{sal}) + F_{frio}(T_{fria} - T_{sal})}{AL_0^2} \right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta L \end{bmatrix} \\ & + \left[ \frac{T_{cal} - T_{sal}}{AL_0} \frac{T_{fria} - T_{sal}}{AL_0} \right] \cdot \begin{bmatrix} \Delta F_{cal} \\ \Delta F_{frio} \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (22)$$

Aplicando a la ecuación de flujo:

$$\Delta \dot{L} = \frac{\Delta F_{cal}}{A} + \frac{\Delta F_{frio}}{A} \quad (23)$$

En forma de espacio de estados tenemos en conjunto:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{T} \\ \Delta \dot{L} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{F_{cal} + F_{frio}}{AL_0^2} & \frac{F_{cal}(T_{sal} - T_{cal}) + F_{frio}(T_{sal} - T_{fria})}{AL_0^2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta T \\ \Delta L \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T_{cal} - T_{sal}}{AL_0} & \frac{T_{fria} - T_{sal}}{AL_0} \\ \frac{1}{A} & \frac{1}{A} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \Delta F_{cal} \\ \Delta F_{frio} \end{bmatrix} \quad (24)$$

Una vez que se obtiene un modelo linealizado del sistema de mezclado, se construye el diagrama que permita simular su comportamiento bajo un esquema de control tipo PID tal y como se aprecia en la siguiente figura 39.

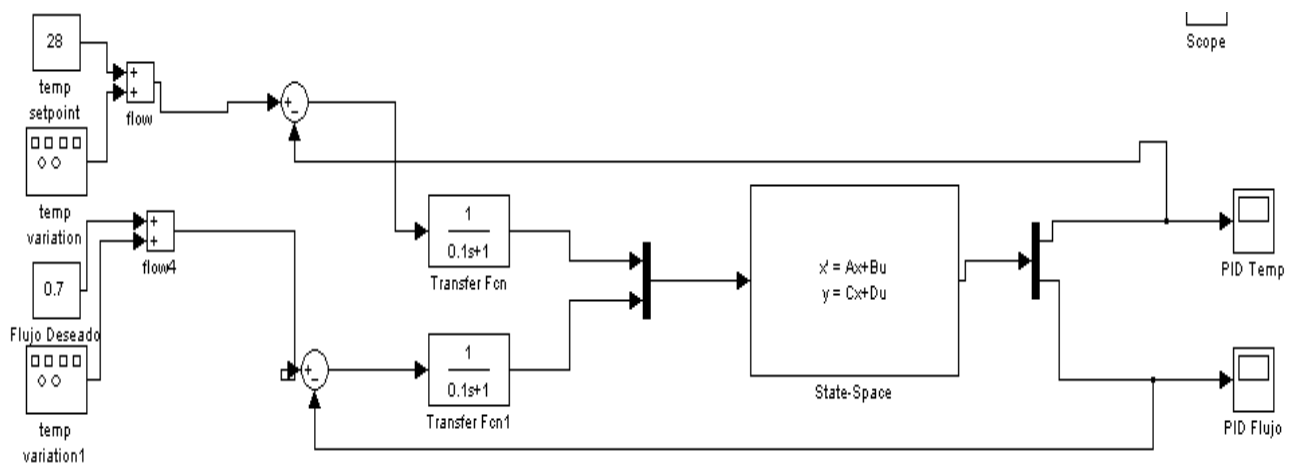


Figura 39. Diagrama de simulación del sistema de mezclado con controlador PID

Los parámetros de la simulación son las siguientes:

- Temperatura Deseada: 26 °C
- Temperatura Caliente: 40 °C
- Temperatura Fría: 10 °C
- Flujo Deseado: 0.7

Ganancias del Controlador de temperatura:

- P = 1
- D = 0.1
- I = 0



Ganancias del Controlador de flujo:

- $P=1$
- $D=0.1$
- $I=0$

#### 4.3.1 Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador PID

Se ha hecho la simulación mediante el software Simulink, con la finalidad de conocer la respuesta que tiene la salida de temperatura con el controlador PID.

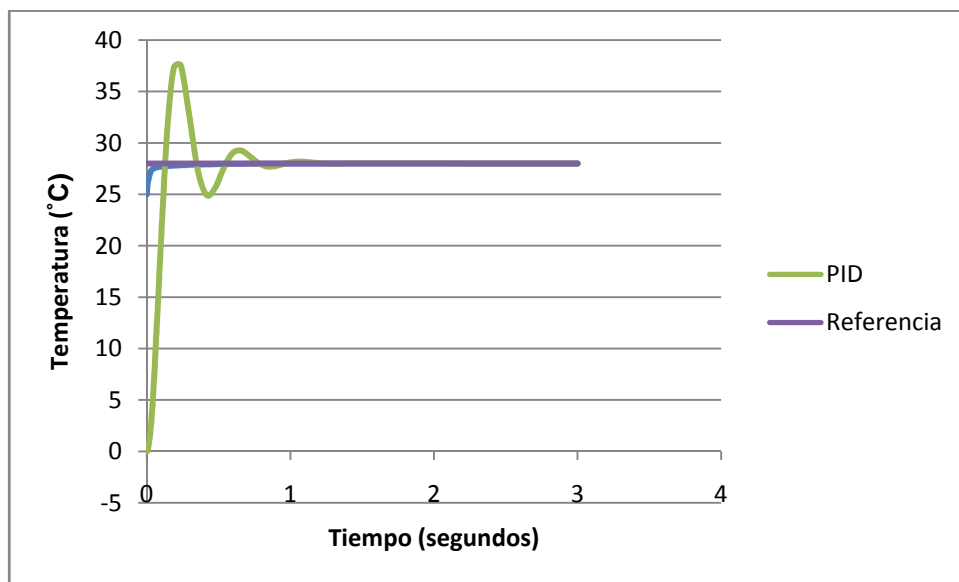


Figura 40.- Respuesta de la temperatura de salida con control PID

Como puede observarse en la figura 40, aunque la temperatura deseada es de 27 °C, con este tipo de controlador se alcanza una temperatura de hasta 37 °C, lo cual representa en términos físicos, una sensación desagradable para el usuario. Se debe tener cuidado con este tipo de controladores cuando las variables a controlar se encuentran en contacto con seres humanos, puesto que a partir de los 40 °C, la temperatura puede provocar severos

daños en la piel durante una exposición prolongada. Se trata de una de las características intrínsecas de este tipo de controladores PID, es decir, el sobretiro, y que representa un riesgo para los usuarios de este tipo de sistemas donde la variable de salida puede encontrarse en contacto con seres humanos.

#### 4.3.2 Respuesta de flujo en la salida del sistema mezclador con controlador PID

Se ha hecho la simulación mediante el software Simulink, con la finalidad de conocer la respuesta que tiene la salida de flujo con el controlador PID.

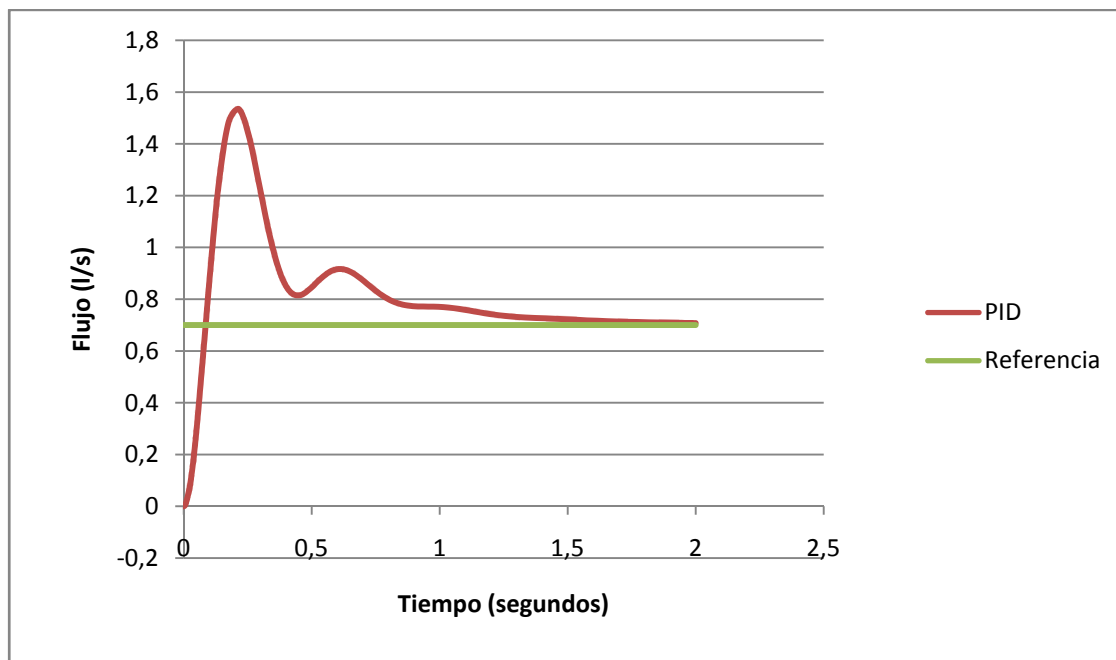


Figura 41.- Respuesta de flujo en la salida con control PID

Como puede observarse en la figura 41, el flujo deseado es de 0.7 % flujo, sin embargo debido a la acción del controlador PID en la variable de flujo, la respuesta del sistema se dispara en cierto momento hasta llegar a un flujo de 1.4 % flujo, lo cual provocaría una sensación desagradable al usuario al percibir demasiado flujo en contacto con su cuerpo.

## 4.4 Control Difuso

Una vez que se ha diseñado el controlador difuso en base al análisis de la dinámica del sistema, se procede a simular el sistema completo, es decir el controlador difuso y el modelo de la planta, esto se realiza con el objetivo de conocer la respuesta del sistema con el controlador. La programación del controlador difuso se ha realizado mediante el Fuzzy Logic Toolbox de Matlab. Una vez que se ha desarrollado la parte del controlador, se exporta a la plataforma Simulink, donde puede utilizarse en forma de bloque para simularse, tal y como se puede apreciar en la figura 42. Con esta simulación se podrá conocer la respuesta del sistema bajo el esquema de control difuso.

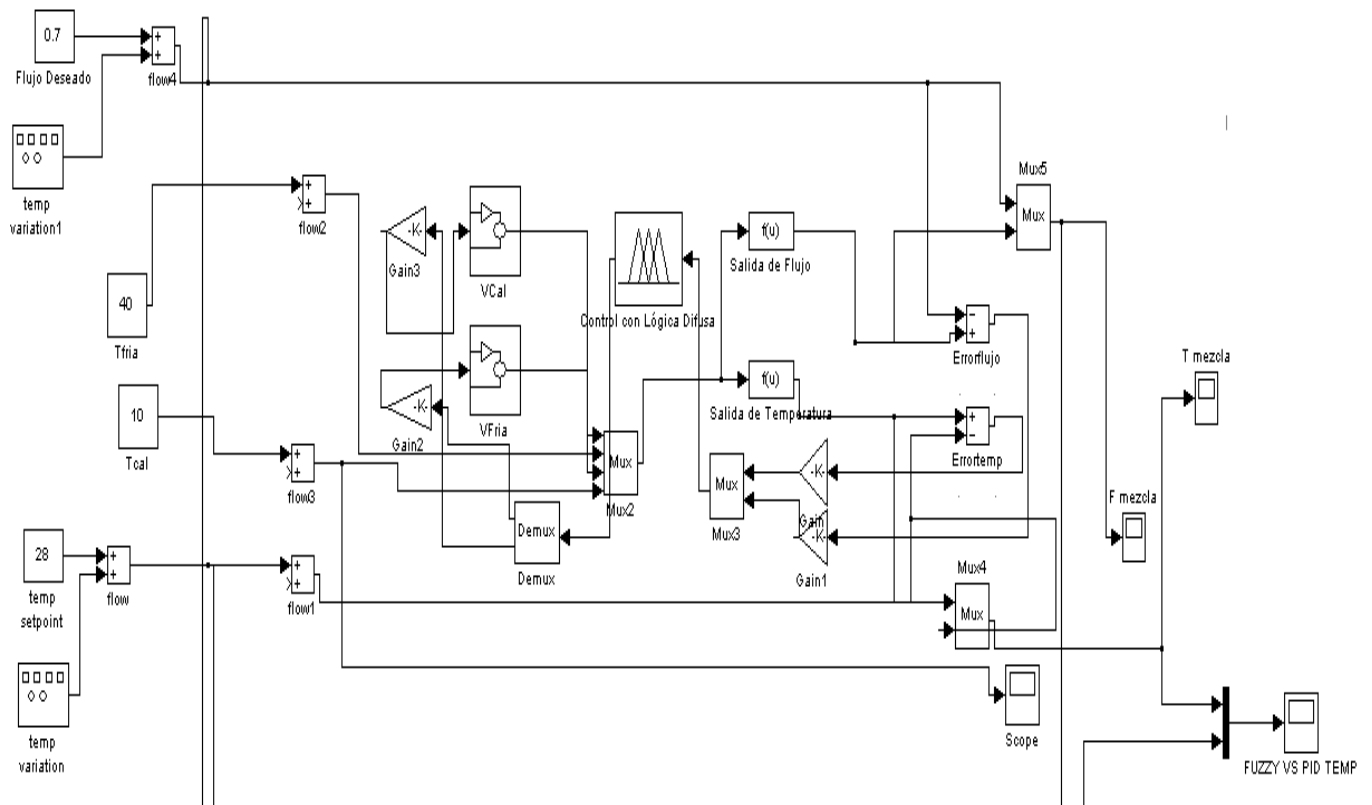


Figura 42. Diagrama de simulación del sistema de mezclado con controlador difuso

#### 4.4.1 Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso

Se ha hecho la simulación mediante el software Simulink, con la finalidad de conocer la respuesta que tiene la salida de temperatura con el controlador Difuso. La temperatura que se desea alcanzar en esta simulación es de 28°C.

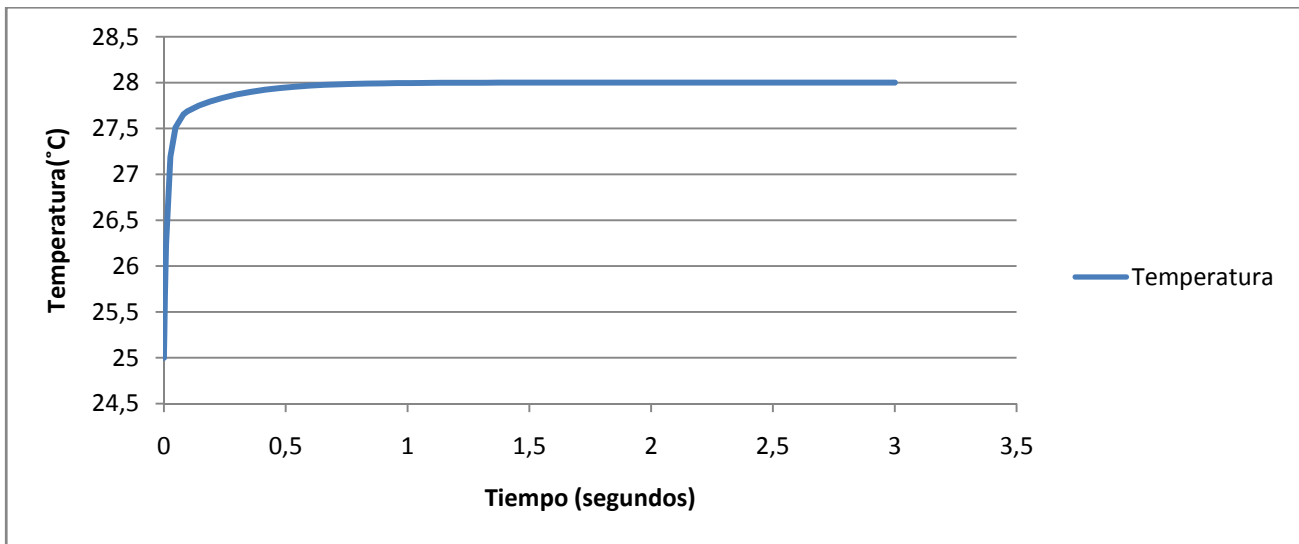


Figura 43.- Respuesta de la temperatura de salida con el controlador difuso

Como puede observarse, la respuesta del sistema con un controlador difuso es muy suave, además se alcanza un error estacionario de cero. La velocidad con la que el sistema responde es muy rápida, superando al controlador PID, ya que no se presenta sobretiro y se alcanza la temperatura deseada de manera rápida.

#### 4.4.2 Respuesta de flujo en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso

Se ha hecho la simulación mediante el software Simulink, con la finalidad de conocer la respuesta que tiene la salida de flujo con el controlador Difuso.

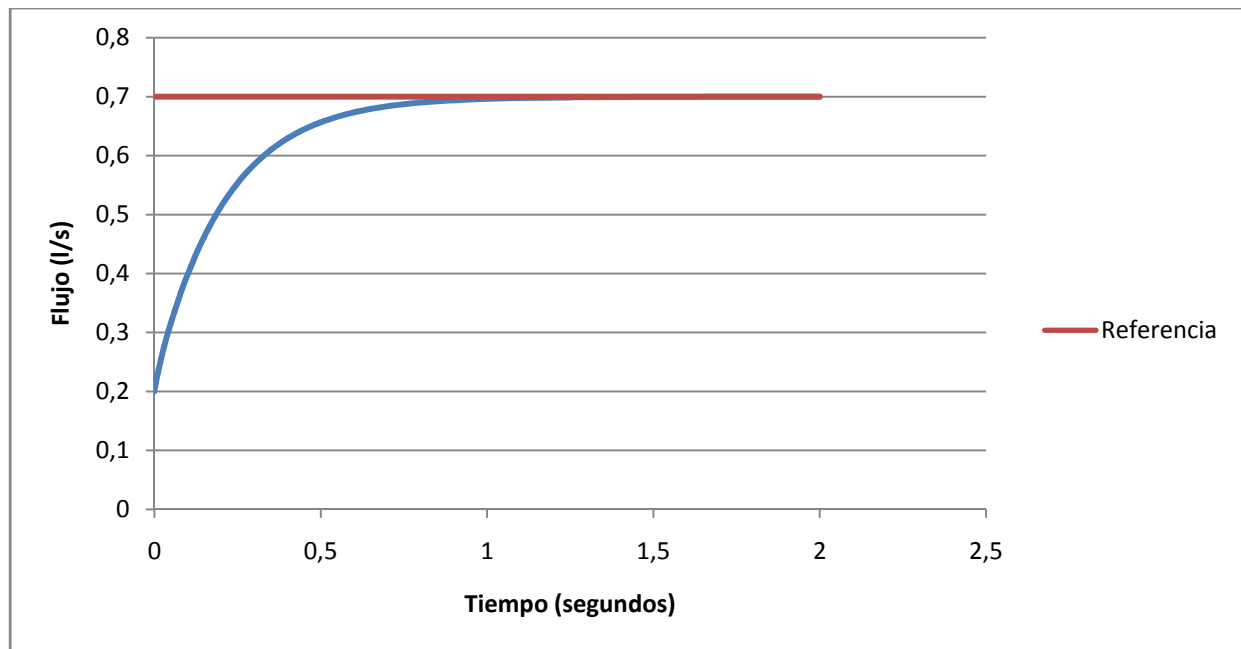


Figura 44.- Respuesta de flujo de salida con controlador difuso

Como puede observarse en la figura 44, el flujo deseado se alcanza de manera suave y rápida, lo que permite tener al usuario, una mayor comodidad y seguridad al utilizar este tipo de controladores. Como ha podido observarse, la respuesta del controlador difuso supera en desempeño al controlador PID, tanto en velocidad como en desempeño. Aunque ambos controladores alcanzan la temperatura y flujo deseados, es importante el señalar que la respuesta transitoria de ambos es muy diferente, de tal manera que el controlador difuso en ningún momento sobrepasa la temperatura a la que se desea obtener.

#### 4.5 Comparación entre controlador Difuso y PID.

Para poder establecer qué tipo de controlador presenta una mejor respuesta para controlar el sistema, se ha comparado la respuesta que tiene el controlador PID con el controlador Difuso diseñado en este trabajo. El diagrama hecho en simulink se aprecia en la figura 43.

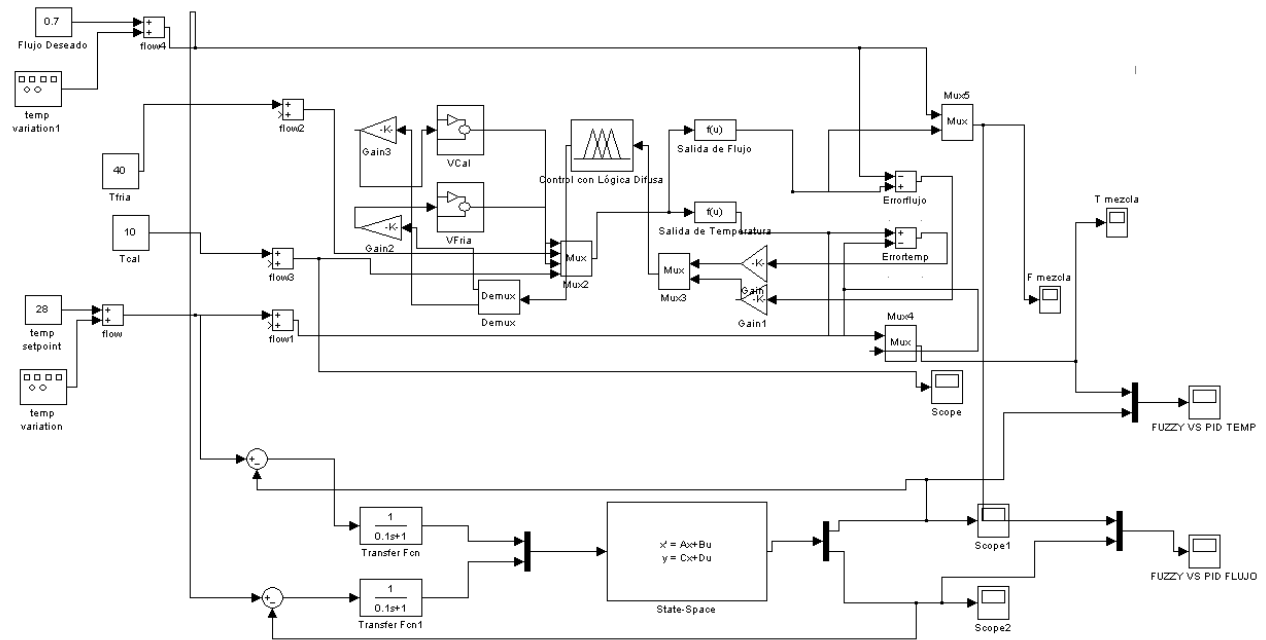


Figura 45. Diagrama de comparación entre controlador tipo PID y el controlador Difuso.

#### 4.5.1 Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso y controlador PID

A continuación se comparará la respuesta que tiene el sistema en la salida temperatura con los controlador PID y Difuso desarrollados en este trabajo.

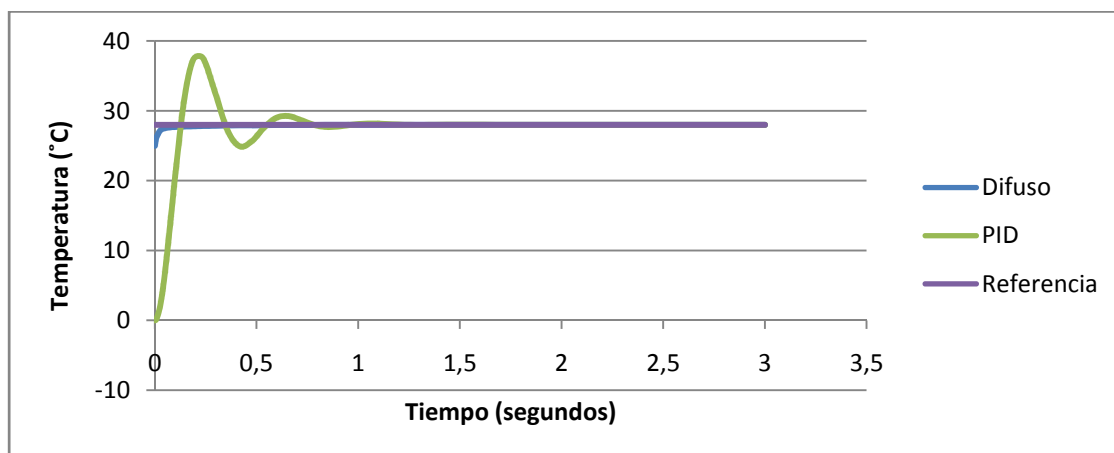


Figura 46.- Comparativa entre controlador PID y controlador difuso

En la imagen 46, puede observarse la comparación entre los tipos de respuesta que se obtienen cuando se utiliza un controlador difuso y cuando se utiliza un controlador convencional tipo PID, ambos para controlar la variable de temperatura de salida del sistema de mezclado.

#### 4.5.2 Respuesta de flujo en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso y controlador PID

A continuación se comparará la respuesta que tiene el sistema en la salida flujo con los controlador PID y Difuso desarrollados en este trabajo.

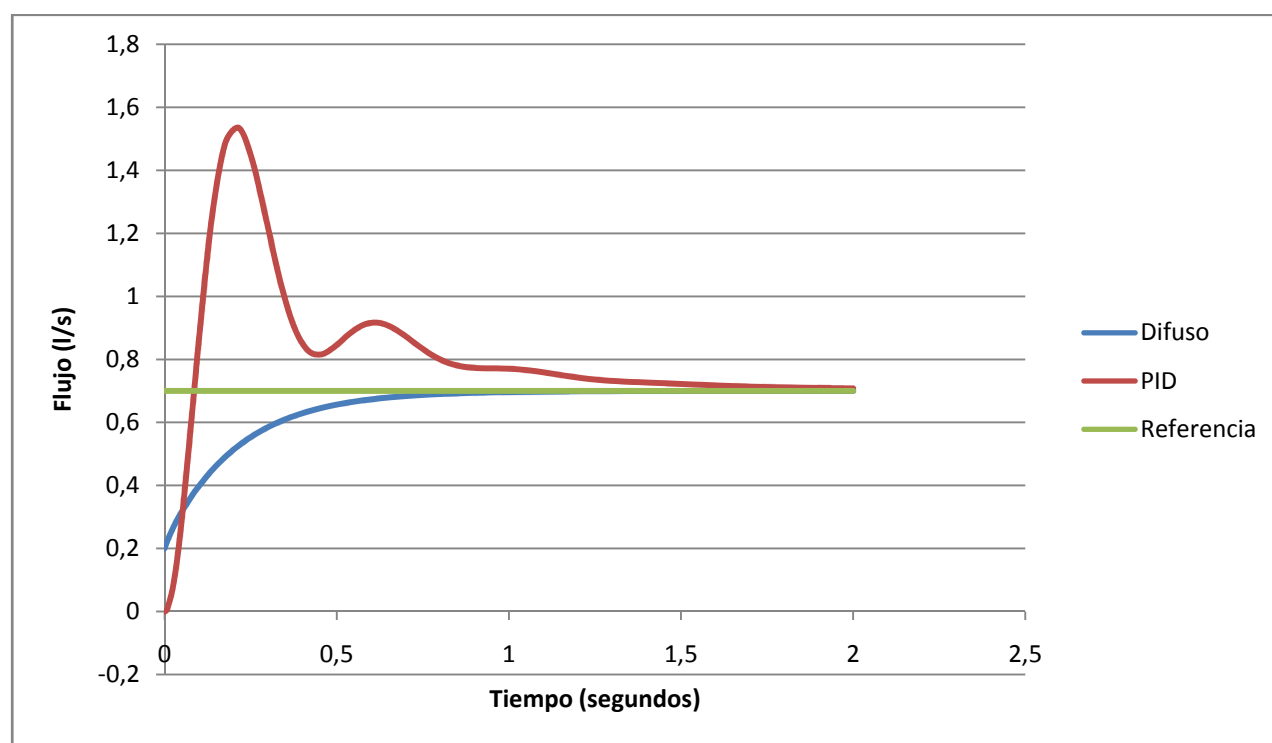


Figura 47.- Comparativa entre un controlador PID y el controlador difuso en flujo

Observando la figura 47, se observa notablemente una gran mejoría para el control de flujo de salida del sistema, con el control PID se llega a tener en un momento hasta un flujo de 1,5 l/s, que es prácticamente un valor muy cercano al doble del flujo que se desea obtener.

Por su parte el controlador difuso alcanza los 0.7 % flujo mucho más rápido que el controlador PID, además de que en ningún momento supera el flujo requerido, lo que representa una respuesta suave y eficiente para regular el sistema.

#### 4.5.3 Respuesta de temperatura en la salida del sistema mezclador con controlador Difuso y controlador PID con variaciones en la temperatura de referencia.

Respuesta de temperatura en la salida del sistema ante cambios en la referencia de temperatura de  $+8^{\circ}\text{C}$  y  $-8^{\circ}\text{C}$ , es decir, pasar de desear  $24^{\circ}\text{C}$  a  $32^{\circ}\text{C}$  y de  $32^{\circ}\text{C}$  a  $24^{\circ}\text{C}$  respectivamente. La referencia de flujo se mantiene fija en 0.7 % flujo.

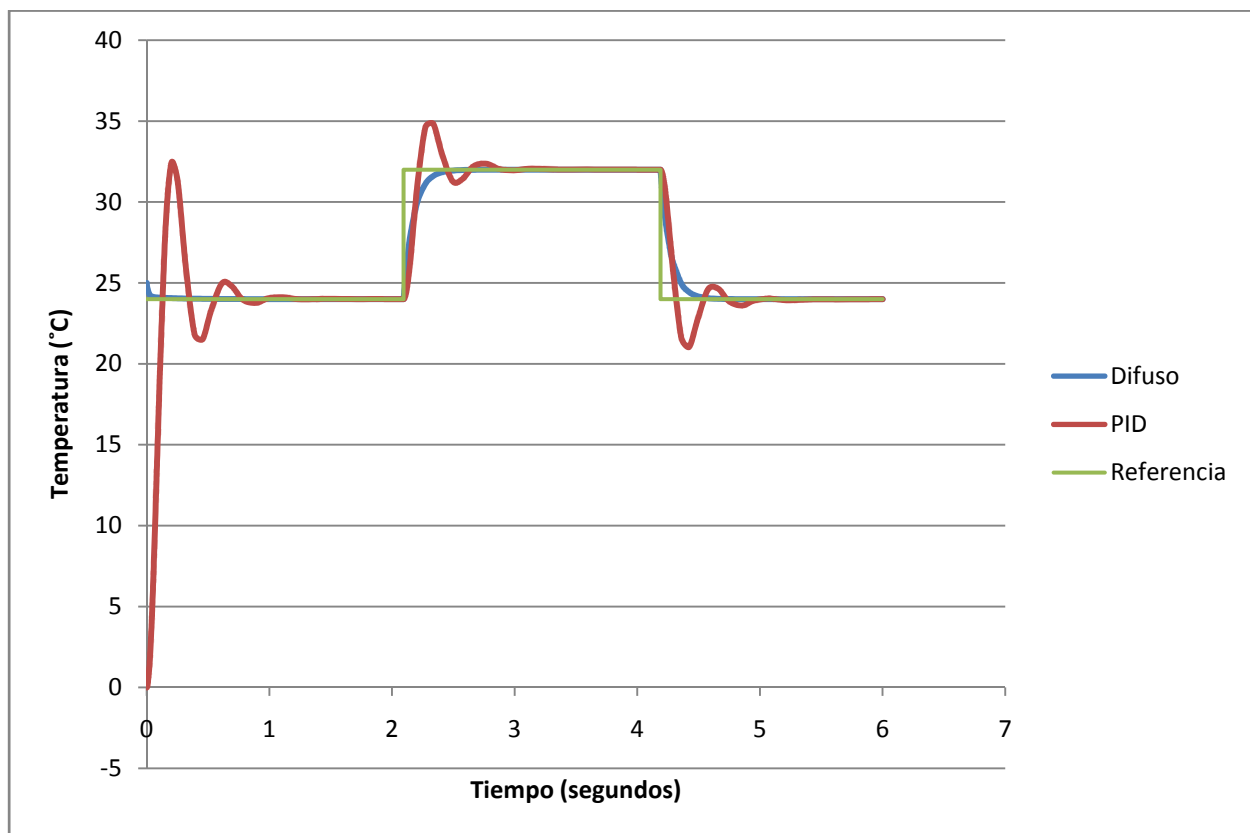


Figura 48.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular la temperatura de salida ante cambios en la referencia de temperatura.



Respuesta de flujo en la salida del sistema ante cambios en la referencia de temperatura de  $+8^{\circ}\text{C}$  y  $-8^{\circ}\text{C}$ , es decir, pasar de desear  $24^{\circ}\text{C}$  a  $32^{\circ}\text{C}$  y de  $32^{\circ}\text{C}$  a  $24^{\circ}\text{C}$  respectivamente. La referencia de flujo se mantiene fija en 0.7 % flujo.

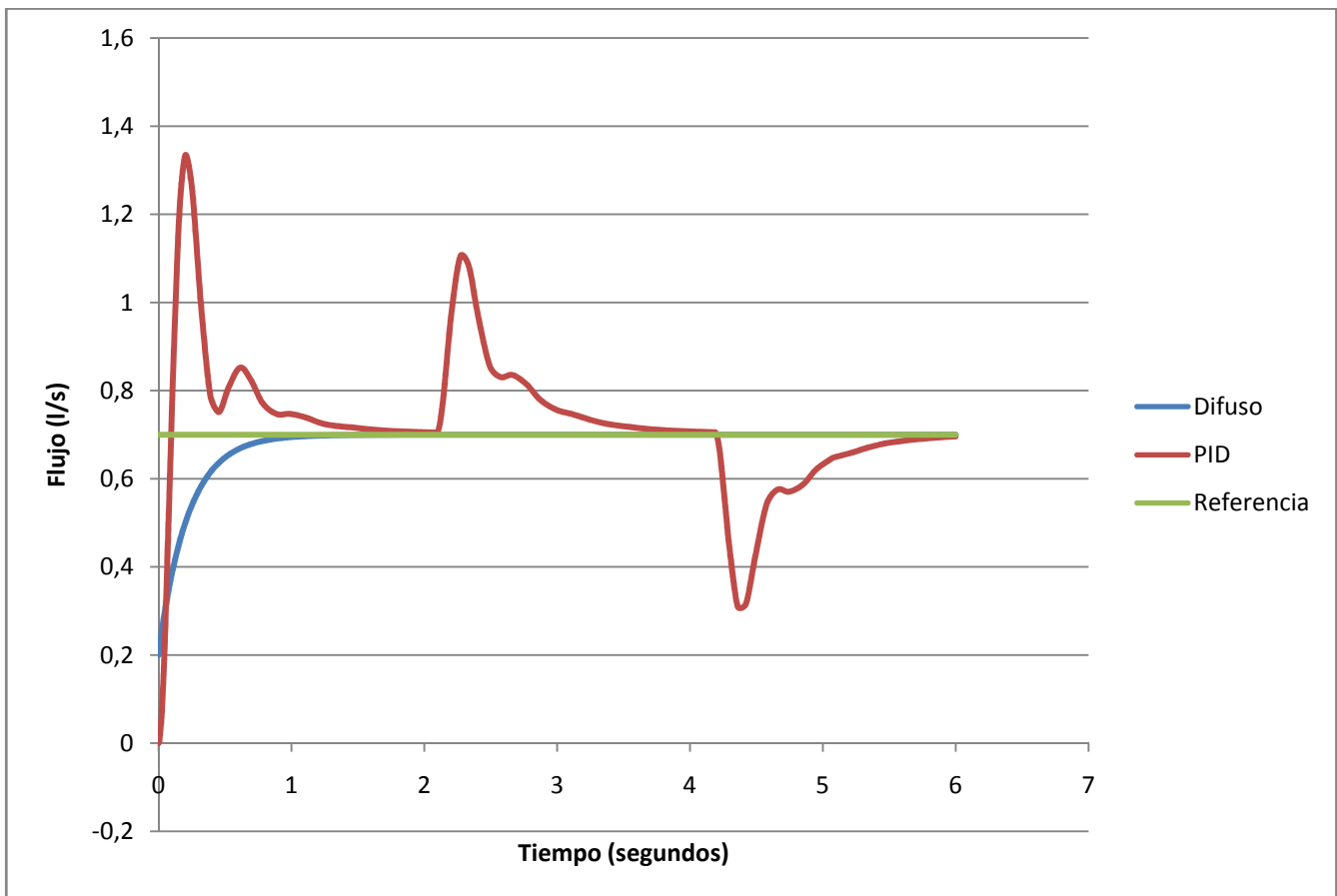


Figura 49.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular el flujo de salida ante cambios en la referencia de temperatura.

Respuesta de temperatura en la salida del sistema ante cambios en la referencia de flujo de 0.4 % flujo y -0.4 % flujo, es decir, pasar de desear 0.5 % flujo a 0.9 % flujo y de 0.9 % flujo a 0.5 % flujo respectivamente. La referencia de temperatura se mantiene fija en  $28^{\circ}\text{C}$ .

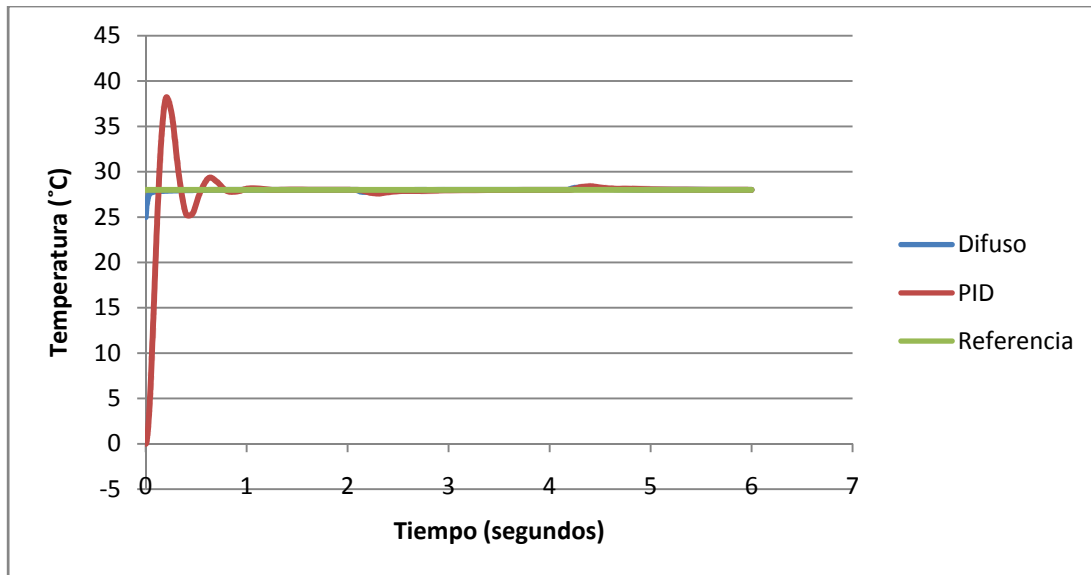


Figura 50.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular la temperatura de salida ante cambios en la referencia de de flujo.

Respuesta de flujo en la salida del sistema ante cambios en la referencia de flujo de 0.4 % flujo y -0.4 % flujo, es decir, pasar de desear 0.5 % flujo a 0.9 % flujo y 0.9 % flujo a 0.5 % flujo respectivamente. La referencia de temperatura se mantiene fija en 28 °C.

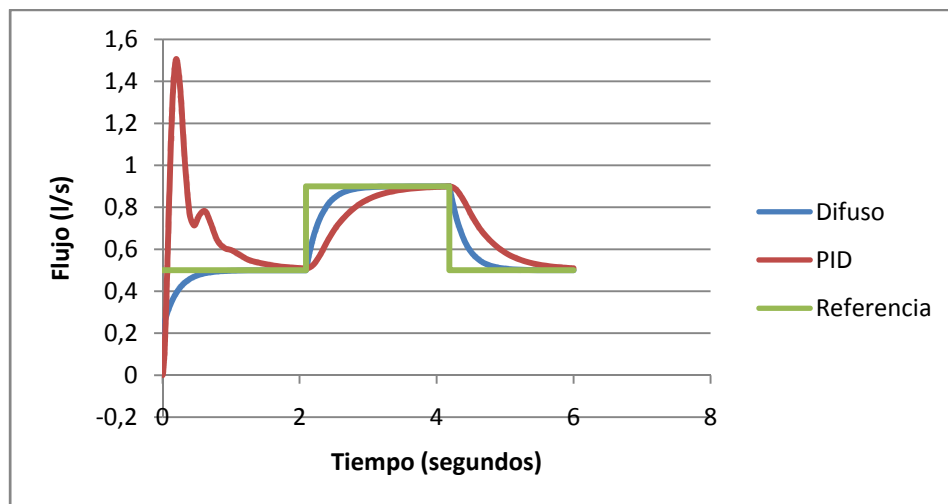


Figura 51.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular el flujo de salida ante cambios en la referencia de de flujo.

Respuesta de temperatura en la salida del sistema ante cambios en la referencia de temperatura de +8 °C y -8 °C, es decir, pasar de desear 24 °C a 32°C y de 32 °C a 24°C respectivamente, además la referencia de flujo presenta cambios de 0.4 % flujo y -0.4 % flujo, es decir, pasar de desear 0.5 % flujo a 0.9 % flujo y de 0.9 % flujo a 0.5 % flujo respectivamente.

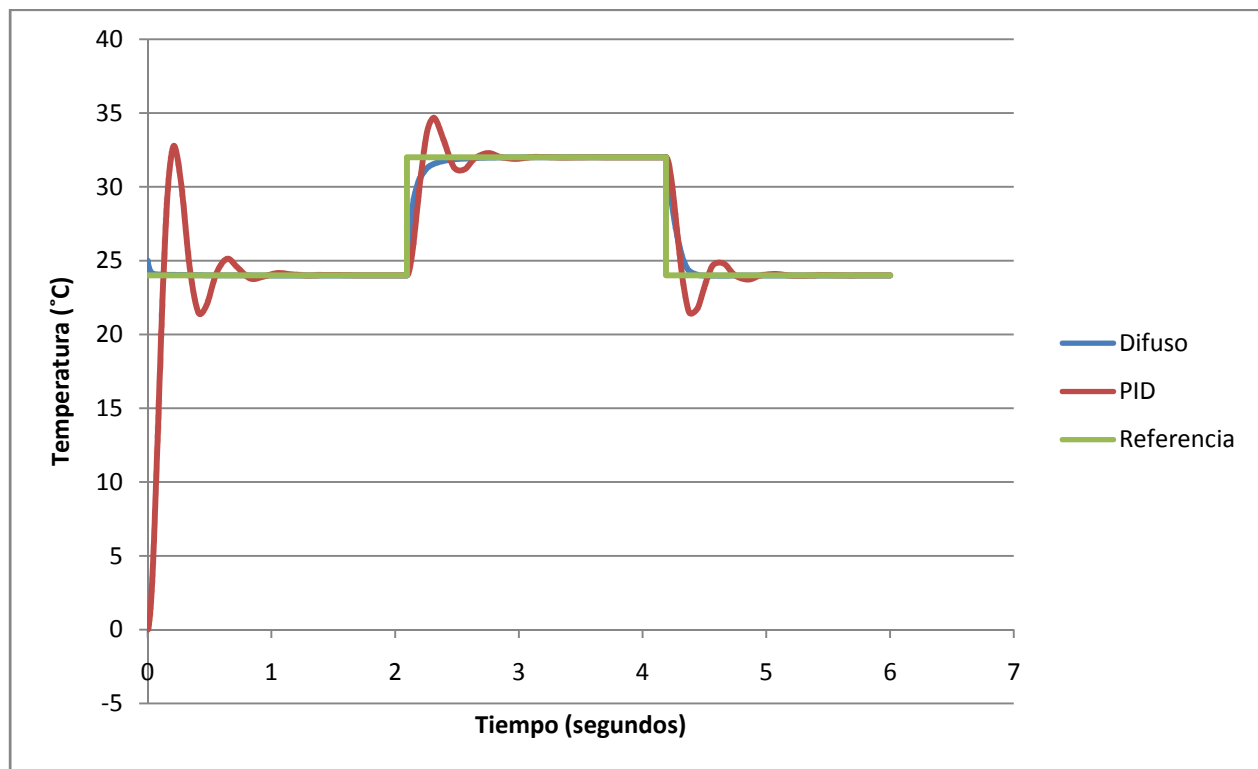


Figura 52.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular la temperatura de salida ante cambios en la referencia de temperatura y referencia de flujo.

Respuesta de flujo en la salida del sistema ante cambios en la referencia de temperatura de +8 °C y -8°C, es decir, pasar de desear 24°C a 32°C y de 32 °C a 24°C respectivamente.

La referencia de flujo presenta cambios de 0.2 % flujo y -0.2 % flujo, es decir, pasar de 0.5 % flujo a 0.9 % flujo y de 0.9 % flujo a 0.5 % flujo respectivamente.

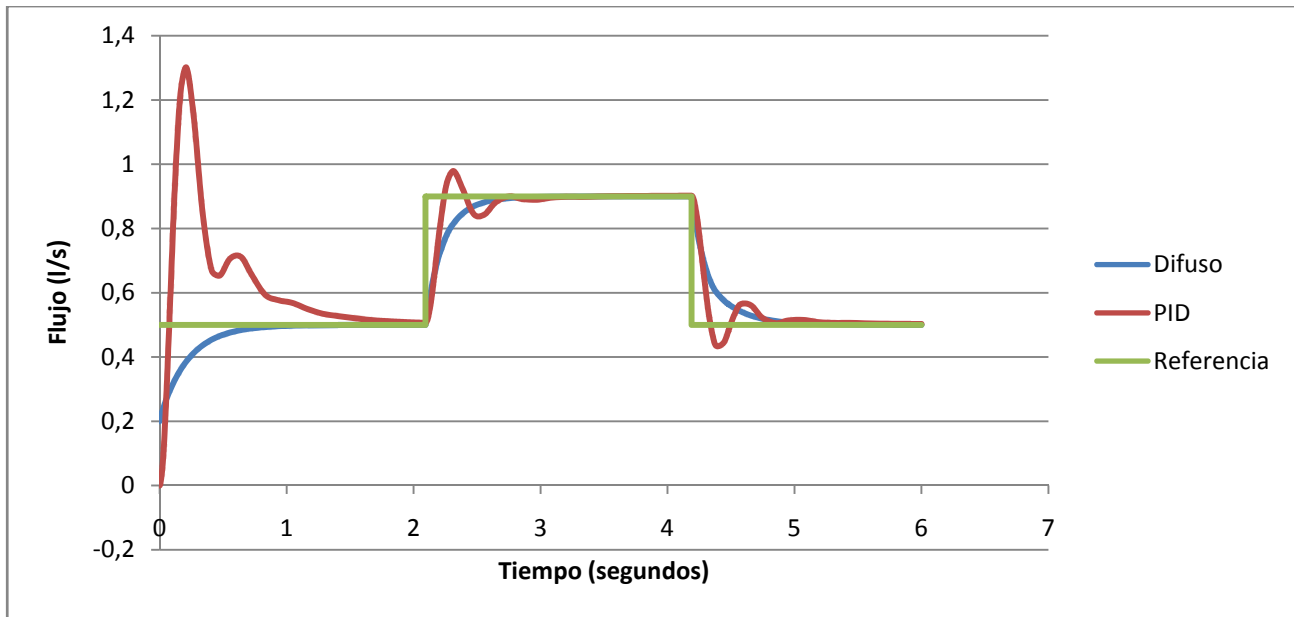


Figura 53.- Comparación entre el controlador Difuso y PID para regular el flujo de salida ante cambios en la referencia de temperatura y referencia de flujo.

Como se ha podido observar, la respuesta del sistema de control tipo PID presenta sobretiro, un efecto indeseable en los sistemas de control de temperatura, en cambio, el controlador difuso ofrece una respuesta del tipo de primer orden, a través de la cual no se presentan oscilaciones ante cambios en las referencias de entrada.

#### 4.6 Simulación del sistema de mezclado de agua

Con la finalidad de conocer la respuesta del sistema ante distintas entradas, se ha desarrollado un simulador que modela mediante la ecuación de intercambio de calor los porcentajes requeridos para alcanzar una temperatura determinada. Se debe tener en cuenta que se trata de un sistema multivariable con 4 entradas, (2 de flujo y 2 de temperatura) y 2 salidas (1 de temperatura y 1 de flujo de salida) lo que complica su análisis, dado que cada una de las entradas influye de manera significativa en cada una de las salidas.

Con la ecuación de transferencia de calor descrita en el capítulo 2, es posible calcular la temperatura de la mezcla de agua cuando existen dos caudales de entrada al sistema de mezclado, es decir, un caudal de agua con una temperatura fría y un caudal de agua con una temperatura caliente.

Como el único tipo fluido mezclado aquí es el agua, el calor específico es el mismo y puede reescribirse la ecuación de la siguiente manera.

$$T_m = \frac{F_f T_f + F_c T_c}{F_f + F_c} \quad (26)$$

Para el caso de flujo de salida, la ecuación es la siguiente:

$$F_m = F_f + F_c \quad (27)$$

Partiendo de las ecuaciones anteriores se ha desarrollado un programa que permite calcular el porcentaje de flujo necesario para alcanzar una temperatura y flujo determinados. El programa requiere como entrada los siguientes valores:

- Temperatura de Agua Fría
- Temperatura de Agua Caliente
- Temperatura Deseada
- Flujo Deseado

La ejecución del programa que calcula el porcentaje de flujo requerido para mezclar agua a diferentes temperaturas y obtener un flujo y una temperatura deseados se puede observar en la figura 54.

```

El siguiente programa calcula el porcentaje de flujo requerido
para mezclar agua a diferentes temperaturas

¿Cual es la temperatura del agua fria <Celsius>?10

¿Cual es la temperatura del agua caliente <Celsius>?15

¿Cual es la temperatura que desea obtener? <Celsius>?13

¿Que cantidad de flujo desea obtener?1

```

Figura 54.- Programa que calcula el porcentaje de flujo requerido para mezclar agua

Se ejecuta el programa y se despliegan los valores en porcentaje, tanto de flujo frío como de flujo caliente que son requeridos para obtener la temperatura de la mezcla deseada. Mediante este programa se puede conocer la interacción que tienen las entradas de temperatura al sistema y su efecto en la obtención de la temperatura deseada.

	Temperatura Objetivo	Flujo Objetivo	Flujo Frío Requerido	Flujo Caliente Requerido	Temperatura de mezclado	Flujo de mezclado
Caso 1 Tfria= 10 Tcal= 40	24.0	1.0	0.5333 53.33%	0.4666 46.66%	23,9686658	1,0021
Caso 2 Tfria=15 Tcal=35	25.0	0.7	0.35 50.00%	0.35 50.00%	25.0	0,7
Caso 3 Tfria= 10 Tcal= 60	28.0	0.8	0.512 64.00%	0.288 36.00%	28,03196803	0,8008
Caso 4 Tfria=15 Tcal=42	27.0	0.6	0.3333 55.55%	0.2666 44.44%	26,99899983	0,5999
Caso 5 Tfria=13 Tcal=37	24.0	0.8	0.4333 54.166%	0.3666 45.83%	23,99937492	0,7999

Tabla 15.- Cálculo de flujo requerido para obtener una temperatura y un flujo determinados

Como puede observarse en la tabla 15, el programa desarrollado permite conocer la cantidad de flujo frío y de flujo caliente que se necesita para obtener una temperatura y un flujo objetivos. Estos resultados son útiles para controlar el sistema de mezclado de manera manual, sin embargo, dado que se desea automatizar este proceso, el sistema de control difuso tendrá la misión de aproximar las ecuaciones no lineales, tanto de temperatura de mezclado como de flujo de mezclado. Al ser un sistema automático se espera que después de unas cuantas iteraciones, se obtengan resultados muy aproximados a los que se han generado con este programa, siguiendo la estrategia de control en lazo cerrado y operando el sistema de manera automática mediante la retroalimentación del error de flujo y el error de temperatura.

#### 4.7 Comparación entre el mezclador difuso y el programa que calculador de flujos requeridos.

Para comprobar que el algoritmo y el código desarrollado en C++ del mezclador difuso se ha desarrollado de manera adecuada, se compara con los resultados que se obtienen al ejecutar el programa que calcula los porcentajes de flujo requeridos para alcanzar una temperatura y flujo objetivo con el programa mezclado difuso. Como se muestra en la tabla 16 los resultados son muy aproximados entre sí.

Para esta comparación se analizan 4 casos en donde se define la temperatura de agua fría y la temperatura de agua caliente para a partir del mezclado entre ellas obtener una temperatura y un flujo requerido. Los resultados se pueden apreciar en la tabla 16.

	<b>Mezclador Difuso</b>	<b>Programa que calcula los flujos requeridos</b>
<b>Caso 1</b> Tfria= 10°C Tcal= 40°C Temp Objetivo = 28°C Flujo Objetivo = 1	% Flujo Frio= 0.398156 % Flujo Caliente =0.601843	% Flujo Frio= 0.4 % Flujo Caliente =0.6
<b>Caso 2</b> Tfria=15°C Tcal=35°C Temp Objetivo= 27°C Flujo Objetivo = 0.9	% Flujo Frio= 0.361627 % Flujo Caliente =0.532476	% Flujo Frio= 0.36 % Flujo Caliente =0.54
<b>Caso 3</b> Tfria= 15°C Tcal= 40°C Temp Objetivo= 25°C Flujo Objetivo= 0.8	% Flujo Frio= 0.482418 % Flujo Caliente =0.31758	% Flujo Frio= 0.48 % Flujo Caliente =0.32
<b>Caso 4</b> Tfria=15°C Tcal=42°C Temp Objetivo= 24°C Flujo Objetivo= 1	% Flujo Frio= 0.669764 % Flujo Caliente =0.330159	% Flujo Frio= 0.6666 % Flujo Caliente =0.3333

Tabla 16. Comparación entre el mezclado difuso y el programa que calcula los flujos requeridos para obtener temperatura y flujo deseados

Como podemos observar en la tabla anterior, los resultados obtenidos mediante el programa mezclador difuso son muy cercanos a los obtenidos mediante el programa que calcula los flujos requeridos para alcanzar una temperatura y flujo deseados. Se observa que el mezclador difuso cumple su función como aproximador universal de la ecuación no lineal de temperatura y flujo.



## 4.8 Resumen

Tomando en consideración que los controladores difusos pueden regular sistemas no lineales, se ha diseñado el sistema de control difuso que resuelve el problema de la mezcla de agua.

Se han obtenido resultados satisfactorios, logrados en gran medida por el análisis previo que se hizo al sistema, a fin de conocer su dinámica y diseñar el sistema de control difuso a la medida para este proceso de mezclado. Para sistemas multivariantes, los controladores convencionales pierden eficacia ya que están diseñados a partir de un modelo linealizado y las características de respuesta no son deseables en este tipo de procesos térmicos, como lo observado el sobretiro para la regulación de la variable de temperatura.

El controlador difuso, tiene varios parámetros que se pueden ajustar para mejorar la respuesta del sistema, uno de ellos es la elección del universo del discurso de las funciones de membresía, es decir, el seleccionar aquellas zonas que mejor modelan las entradas al proceso, además de la elección del método de inferencia, que define en gran medida las zonas de operación del controlador y las funciones de membresía del elemento de control.

## Conclusiones

Cuando el sistema se diseña de manera correcta, siguiendo los parámetros de diseño adecuados para la aplicación, el resultado es una gran velocidad de respuesta. Para este proceso de mezclado térmico del agua, mediante la regulación a través de un controlador difuso se alcanza la temperatura y el flujo deseados de manera muy rápida, superando en velocidad a un controlador convencional del tipo PID.

Un controlador PID no es recomendable para regular sistemas que tienen un cambio rápido en los parámetros de operación del sistema, dado que con cambios en las entradas y la referencia, el sistema podría salirse del esquema de control y quedar sin ningún tipo de regulación en algún momento. Por el contrario, el sistema de control difuso es robusto y responde de manera adecuada ante cambios y perturbaciones bruscas en el sistema. Se trata de una tecnología novedosa y los resultados obtenidos, en términos de control, son transferidos entre diferentes procesos.

Durante la etapa de simulación del controlador con el proceso se logra un comportamiento suave en la respuesta del sistema, a comparación con el controlador PID, que presentan oscilaciones en la respuesta. Por el contrario el control difuso tiene un buen comportamiento al momento de controlar sistemas multivariables, como el que aquí se ha expuesto. El sistema de control difuso tiene una mejor respuesta en comparación con los controladores convencionales para el control de sistemas multivariables de mezclado.

## Referencias

- [1] L. A. Zadeh, "Fuzzy Sets," Information Control, vol. 8, pp. 338-353, 1965.
- [2] L. A. Zadeh, "Outline of a new approach to the analysis of complex systems and decision processes," IEEE Trans. Systems, Man, and Cybernetics, vol. 3, pp. 28-44, 1973.
- [3] L.A. Zadeh, "The evolution of systems analysis and control: a personal perspective," IEEE control systems, pp. 95-98, June 1996.
- [4] L.A. Zadeh, "Fuzzy logic," IEEE Computer, pp. 83-93, April 1988.
- [5] L.A. Zadeh, "Soft computing and fuzzy logic," IEEE Software, pp. 48-56, Nov. 1994.
- [6] L.A. Zadeh, "Foreword - recognition technology and fuzzy logic," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 9, no. 1, pp. 3-4, Feb. 2001.
- [7] L.A. Zadeh, "The roles of soft computing and fuzzy logic in the conception, design and deployment of intelligent system," Proc. of IEEE Asia Pacific Conference on Circuits and Systems, Seoul, Korea, pp. 18-21, Nov. 1996.
- [8] MENDEL, J., M., "Fuzzy logic systems for engineering: a tutorial", in Proceedings of the IEEE, VOL. 83, NO 3, MARCH 1995.
- [9] Z. Chi, H. Yan, T. Pham, Fuzzy Algorithms: With applications to Image Processing and Pattern Recognition, World Scientific, Singapore, 1996.
- [10] D. Driankov, H. Hellendoorn and M. Reinfrank, "An Introduction to Fuzzy Control," Narosa Publishing House, New Delhi, 1998.
- [11] Sushmita Mitra, Sankar K. Pal, "Fuzzy Multi-Layer Perception, Infering and Rule Generation," IEEE Trans. Neural Networks, vol. 6, no. 1, pp. 51-63, Jan. 1995.

- [12] Peter Vas, Artificial-Intelligence-Based Electrical Machine and Drives, Oxford University Press, Inc., New York, 1999.
- [13] E. H. Mamdani, "Application of fuzzy algorithms for control of simple dynamic plant," in: Proc. Inst. Elect.Eng., vol. 121, pp. 1585-1588, 1974.
- [14] M. Maeda, S. Murakami, "An automobile tracking control with fuzzy logic," Proc. IEEE conf. syst.symp., Osaka, Japan, pp. 61-66, 1987.
- [15] G.F. Mauer, "A fuzzy logic controller for an ABS braking system.", IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 3, pp. 381-388, 1995.
- [16] R. Stenz, U. Kuhn, "Automation of a batch distillation column using fuzzy and conventional control," IEEE Trans. Control Syst. Technol., vol. 3, pp. 171-176, June 1995.
- [17] J. Yen, R. Langari, L.A. Zadeh, Industrial applications of fuzzy logic and intelligent systems, IEEE Press, New York, 1995.
- [18] J.J. Ostergaard, Fuzzy Automation and Decision Process, M.M. Gupta, G.N. Saridis, and B.R. Gaines, Eds. North-Holland, New York, pp. 285-320, 1977.
- [19] E.H. Mamdani and S. Assilian, "An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller," Internat. J. Man Machine Studies, vol. 7, no. 1, pp. 1-13, 1975.
- [20] P.J. King, E.H. Mamdani, "—," Automatica, vol. 13, pp. 235-242, 1977.
- [21] L. Holmblad, I.I. Ostergaard, "Control of a cement kiln by fuzzy logic," in Fuzzy Information and Decision Processes, M.M. Gupta and E. Sanchez, Eds. Amsterdam, The Netherlands: North-Holland, 1982, pp. 389-399.
- [22] M. Sugeno, G.K. Park, "An approach to linguistic instruction based learning and its application to helicopter flight control," Proc. 5th IFSA world congress, pp. 1082-1085, 1993.

- [23] V.G. Moudgal, W.A. Kwong, K.M. Passino, S. Yurkovich, "Fuzzy learning control for a flexible-link robot," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 3, pp. 199-210, May 1995.
- [24] T. Ishikawa, "A study on fuzzy control of an arm robot," B.E. thesis, Dept. Contr. Eng., Tokyo Inst.Technol., 1988.
- [25] H. Takeda, T. Ishikawa, "Adaptive fuzzy control for catch-ball system," Proc. 4th fuzzy syst. symp., Tokyo, Japan, pp. 77-82, May 1998.
- [26] P.P. Angelov, Evolving Rule-Based Models.A Tool for design of flexible adaptive systems, Physica- Verlag, Wurzburg, 2002.
- [27] O. Cordón, F. Herrera, F. Hoffmann, L. Magdalena, Genetic Fuzzy Systems - Evolutionary Tunning and Learning of Fuzzy Knowledge Bases, World Scientific, Singapore, 2001.
- [28] F.Herrera, M. Lozano, J.L. Verdegay, Genetic Algorithms and Soft Computing, Physica-Verlag, Heidelberg, 1996.
- [29] W. Pedrycz, Fuzzy Evolutionary Computation, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, 1997.
- [30] E. Sanchez, T. Shibata, L. Zadeh, Genetic algorithms and fuzzy logic systems - Soft computing perspectives, World Scientific, Singapore, 1997.
- [31] G. Hwang, S. Lin, "A stability approach to fuzzy control design for nonlinear systems," Fuzzy Sets and Systems, vol. 48, pp. 279-287, 1992.
- [32] T.A. Johansen, "Fuzzy Model Based Control: Stability, Robustness, and Performance issues," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 2, no. 3, pp. 221-234, Aug. 1994.
- [33] S.Y. Yi, M.J. Chung, "Systematic design and stability analysis of a fuzzy logic controller," Fuzzy Sets and Systems, vol. 72, pp. 271-298, 1995.

- [34] Cornelius T. Leondes, Fuzzy Logic and Expert Systems Applications, Academic Press, USA, Vol. 6 of Neural Network Systems Techniques and Applications, 1998.
- [35] H. Kang, "Stability and control of fuzzy dynamic systems via cell-state transitions in fuzzy hypercubes," IEEE Trans. Fuzzy Systems, vol. 1, no. 4, pp. 267-279, Nov. 1993.
- [36] L. Reznik, "Fuzzy Controllers", Newnes, first edition, 1997.
- [37] Mathworks, "Fuzzy Logic Toolbox User's Guide ", Mathworks, Inc., 1999.
- [38] Shakowat ZamanSarkar, A proposed Air-conditioning system using Fuzzy Algorithm for Industrial Application. ICSE IEEE Proc. (2006) 832-834.
- [39] Jyh-Shing, Jang and Chuen-Tsai, R.S., Neuro-fuzzy Modelling and Control, IEEE Proc. 83:3 (1995) 378-406.
- [40] Studies of Thermal Injury II. The Relative Importance of Time and Surface Temperature in the Causation of Cutaneous Burns ,A. R. Moritz and F. C. Henriques, Jr.
- [41] M. Yasin, F.; Tio, A.; Islam, M.S.; Sulaiman, M.S. The Hardware Design of Temperature Controller Based on Fuzzy Logic for Industrial Application Employing FPGA.ICM 2004 Proceedings. The 16th International Conference on Microelectronics. (2004)157 – 160
- [42] Water Temperature Control and Limitation By David W. Viola  
Technical Director, Plumbing Manufacturers Institute
- [43] Common Plumbing Design Problems, Ronald L. George.
- [44] Vaughn Bradshaw The Building Environment: Active and Passive Control System
- [45] Interpretability Issues in Fuzzy Modeling, Jorge Casillas,O. Cordon,Francisco Herrera Triguero,Luis Magdalena, p 87.

- [46] Chuen Chien Lee, Student Member, IEEE Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller - Part I.
- [47] Tong-Tong, J.-R., "La logique floue", Hermès, Paris, 1995.
- [48] Bernadette Bouchon-Meunier\*, Mariagrazia Dotoli\*\*, Bruno Maione\*\*\*  
On the choice of membership functions in a mamdani-type fuzzy controller
- [49] Mizumoto, M., "Fuzzy controls under various fuzzy reasoning methods", in Information Sciences 45, 1988.
- [50] Mohammad Jamshidi, Nader Vadiie and Timothy J. Ross (1993), Fuzzy Logic and Control, Prentice Hall.