

Estudio comparativo de los diferentes métodos de defuzzificación utilizados en
la lógica fuzzy, para el control automático de
la temperatura y el caudal a la carga de la corriente de
Calentamiento de un intercambiador de calor

Lucas Paúl Brito Daza
Daniel Augusto Rangel Villabona

Universidad Autónoma de Bucaramanga
Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Bucaramanga
2004

Estudio comparativo de los diferentes métodos de defuzzificación utilizados en
la lógica fuzzy, para el control automático de
la temperatura y el caudal a la carga de la corriente de
calentamiento de un intercambiador de calor

Lucas Paúl Brito Daza
Daniel Augusto Rangel Villabona

Trabajo de grado para optar el título de
Ingeniero Mecatrónico

Director
Álvaro José Rey Amaya
Ingeniero Mecánico

Universidad Autónoma de Bucaramanga
Facultad de Ingeniería Mecatrónica
Bucaramanga

2004 ®

Nota de aceptación

Presidente del Jurado

Jurado

Jurado

Bucaramanga, 18 de Noviembre del 2004

AGRADECIMIENTOS

Agradecemos a nuestras familias por el apoyo moral y económico que nos brindaron en el proceso de investigación desarrollado, de igual forma agradecemos a los docentes que nos colaboraron y nos brindaron la información necesaria para nuestro proyecto. Agradecemos a la Universidad Autónoma de Bucaramanga, por facilitarnos sus instalaciones y todos los componentes utilizados en la elaboración del montaje.

Principalmente agradecemos a Dios por darnos la bendición, la salud, la valentía y las ganas de terminar con este proyecto, de igual forma al ingeniero Álvaro Rey Amaya por la dirección desarrollada.

CONTENIDO

	pág.
LISTA DE TABLAS	5
LISTA DE FIGURAS	7
LISTA DE ANEXOS	14
RESUMEN	15
INTRODUCCIÓN	16
1. JUSTIFICACIÓN	17
2. OBJETIVOS	18
3. MARCO TEORICO	19
4. MONTAJE FÍSICO	81
5. SOFTWARE DE CONTROL	109
6. CONTROLADOR CLÁSICO	121
7. CONTROLADOR DIFUSO	130
8. ANÁLISIS COMPARATIVO DE LOS DOS CONTROLADORES	162
9. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MÉTODOS DE DEFUZZIFICACIÓN	178
10. CONCLUSIONES	
BIBLIOGRAFIA	
ANEXOS	

LISTA DE TABLAS

	pág.
Tabla 1. Calibraciones más usuales de las termocuplas	33
Tabla 2. Dimensiones de la válvula de control	85
Tabla 3. Dimensiones del sensor de caudal	88
Tabla 4. Temperatura máxima de resistencia para los diferentes tipos de termocuplas	90
Tabla 5. Tolerancias de los diferentes tipos de Termocuplas	91
Tabla 6. Datos obtenidos en el proceso de calibración del sensor de caudal	100
Tabla 7. Datos de calibración de las termocuplas, prueba 1	102
Tabla 8. Datos de calibración de las termocuplas, prueba 2	108
Tabla 9. Parámetros para cuadrar las constantes del controlador tradicional	125
Tabla 10. Matriz de reglas del controlador difuso	137
Tabla 11. Variables lingüísticas de entrada para el control de caudal	150
Tabla 12. Variables lingüísticas de entrada para el control de Temperatura	151
Tabla 13. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por la altura, en el control de caudal	163
Tabla 14. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por el área, en el control de caudal	165
Tabla 15. Resultados del método de defuzzificación media de centros, en el control de caudal	166
Tabla 16. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por la altura, en el control de caudal	167

Tabla 17. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por el área, en el control de caudal	169
Tabla 18. Resultados de los métodos de defuzzificación en control de caudal	169
Tabla 19. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por la altura en el control de temperatura	170
Tabla 20. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por el área en el control de temperatura	172
Tabla 21. Resultados del método de defuzzificación media de centros en el control de temperatura	173
Tabla 22. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por la altura en el control de temperatura	174
Tabla 23. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por el área en el control de temperatura	176
Tabla 24. Resultados de los métodos de defuzzificación en control de temperatura	176
Tabla 25. Análisis de la respuesta obtenida del controlador difuso en el control de caudal	179
Tabla 26. Análisis de la respuesta obtenida del controlador PID en el control de caudal	180
Tabla 27. Análisis de las respuestas obtenidas del controlador difuso y del controlador PID en el control de caudal	181
Tabla 28. Análisis de la respuesta obtenida del controlador difuso en el control de temperatura	181
Tabla 29. Análisis de la respuesta obtenida del controlador PID en el control de temperatura	182
Tabla 30. Análisis de las respuestas obtenidas del controlador difuso y del controlador PID en el control de temperatura	183

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Intercambiador simple de tubos concéntricos	19
Figura 2. Intercambiador de carcasa y tubos de paso simple (con mezcla de los fluidos)	20
Figura 3. Intercambiador de carcasa y tubos de paso simple (sin mezcla de uno de los fluidos)	21
Figura 4. Pantallas utilizadas en los intercambiadores de carcasa y tubos	22
Figura 5. Fuerzas que actúan sobre el flotador de un rotámetro.	26
Figura 6. Medidor de Caudal tipo Flotador	29
Figura 7. Medidor de Caudal tipo Paleta	30
Figura 8. Diagrama de una termocupla	31
Figura 9. Curvas de relación entre f.e.m vs temperatura de las termocuplas más usuales	33
Figura 10. Velocidad de respuesta de un termopar.	34
Figura 11. Respuesta de un termopar con vainas diferentes	35
Figura 12. Instalación de una vaina o tubo de protección	36
Figura 13. Válvula de globo	39
Figura 14. Válvula de mariposa	40
Figura 15. Válvula de bola	42
Figura 16. Nivel de ruidos en líquidos	44
Figura 17. Acción del control PID	45
Figura 18. Parámetros de Ajuste para la estabilidad en el control	46

Figura 19. Estabilidad en el sentido de Lyapunov	48
Figura 20. Oscilación mantenida	51
Figura 21. Acción del controlador proporcional	52
Figura 22. Relación % de salida vs % de error en un controlador proporcional	53
Figura 23. Función trapezoidal	57
Figura 24. Función singleton	57
Figura 25. Función triangular	58
Figura 26. Función tipo s	58
Figura 27. Esquema de un controlador difuso	69
Figura 28. Estructura interna de un controlador difuso FLC	69
Figura 29. Estructura de un controlador difuso directo con optimización	71
Figura 30. Relación de calibración en un instrumento	76
Figura 31. Relación de desviación en la calibración en un instrumento	77
Figura 32. Error de cero	77
Figura 33. Error de multiplicación	78
Figura 34. Error de angularidad	78
Figura 35. Estructura de un programa en LabWindows/CVI	80
Figura 36. Relación de las válvulas de control deltacp, % de fluido vs. % de abertura	82
Figura 37. Delta port noryl ^R de una válvula de control deltacp	83
Figura 38. Fit pin de una válvula de control deltacp	84
Figura 39. O-rings de una válvula de control deltacp	84
Figura 40. Consejo de instalación para una válvula deltacp	85

Figura 41. Plano de la válvula de control	85
Figura 42. Sensor de caudal de paleta rotativa marca kobold	87
Figura 43. Configuración eléctrica del sensor de caudal	87
Figura 44. Plano del sensor	88
Figura 45. Alambre de extensión de termopar tipo k	89
Figura 46. Modulo NI FP-1000	93
Figura 47. Comunicación entre el Modulo NI FP-1000 y el PC	93
Figura 48. Modulo FP TC-120	94
Figura 49. Diagrama de conexión del modulo FP TC-120	95
Figura 50. Modulo FP-AO-200	95
Figura 51. Diagrama de conexión del modulo FP AO-200	96
Figura 52. Modulo FP-CTR-500	97
Figura 53. Diagrama de conexión del modulo FP CTR-500	97
Figura 54. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 1 – muestra 1	103
Figura 55. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 1 – muestra 2	103
Figura 56. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 2 – muestra 2	106
Figura 56. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 2 – muestra 2	106
Figura 58. Ventanas de LabWindows/CVI	109
Figura 59. Diagrama de Flujo del software de control difuso	112
Figura 60. Panel de entrada del software del control difuso	113
Figura 61. Panel de graficar del software del control difuso	114
Figura 62. Panel de salida del software del control difuso	115

Figura 63. Diagrama de Flujo del software de control PID	117
Figura 64. Panel del control PID	118
Figura 65. Sistema de control PID en lazo cerrado	121
Figura 66. Algoritmo de control PID	122
Figura 67. Diagrama de bloques controlador PID	123
Figura 68. Función del error en el tiempo	124
Figura 69. Respuesta del controlador para un $k_p=3$	126
Figura 70. Respuesta del controlador PID set point 20 lts/min	126
Figura 71. Respuesta del controlador PID set point 25 lts/min	127
Figura 72. Respuesta del controlador PID set point 40 °C	128
Figura 73. Respuesta del controlador PID set point 34 °C	128
Figura 74. Sistema de control difuso en lazo cerrado	130
Figura 75. Algoritmo del controlador difuso	131
Figura 76. Comportamiento del error de caudal en el tiempo	132
Figura 77. Comportamiento del cambio del error de caudal en el tiempo	134
Figura 78. Comportamiento de la corriente de salida	135
Figura 79. Conjuntos difusos del Error	136
Figura 80. Conjuntos difusos del cambio del error	136
Figura 81. Conjuntos difusos de la corriente	137
Figura 82. Respuesta del controlador difuso para Error =16 y Δ Error =0	138
Figura 83. Respuesta del controlador difuso para Error = -7 y Δ Error = 5	138
Figura 84. Respuesta del controlador difuso para Error =16 y Δ Error =0	139
Figura 85. Respuesta del controlador difuso para Error = 5 y Δ Error =3	140

Figura 86. Respuesta del controlador difuso para Error = 6 y Δ Error = -3	141
Figura 87. Respuesta del controlador difuso para Error = 0 y Δ Error = 0	142
Figura 88. Comportamiento del error de la temperatura	142
Figura 89. Comportamiento del Cambio del error de la Temperatura	
Figura 90. Comportamiento de la corriente de salida	144
Figura 91. Conjunto difusos del Error	145
Figura 92. Conjunto difusos del Cambio del Error	145
Figura 93. Conjunto difusos de la corriente de salida	146
Figura 94. Respuesta del controlador difuso para Error = -15 y Δ Error = 5	147
Figura 95. Respuesta del controlador difuso para Error = -3 y Δ Error = 5	147
Figura 96. Respuesta del controlador difuso para Error = 3 y Δ Error = 6	148
Figura 97. Respuesta del controlador difuso para Error = 2 y Δ Error = -2	149
Figura 98. Diagrama de bloques del controlador difuso	149
Figura 99. Bloque Difuso del controlador borroso	150
Figura 100. Funciones De Membresía De Las variables de entrada	151
Figura 101. Etiquetas Lingüísticas De Las Variables De Entrada	151
Figura 102. Bloque de maquina de inferencia del controlador difuzo	153
Figura 103. Funciones de Membresía de la variable de salida	154
Figura 104. Etiquetas lingüísticas de la variable de salida	154
Figura 105. Bloque Defuzzificador del controlador difuso	155
Figura 106. Conjuntos Seleccionados para la Variable Error	156

Figura 107. Conjuntos Seleccionados para la Variable Derivada del Error	157
Figura 108. Conjuntos Seleccionados para la Variable de Salida	157
Figura 109. Conjuntos Difusos de Caudal	157
Figura 110. Conjuntos Seleccionados para el Error	158
Figura 111. Conjuntos Seleccionados para el Cambio del Error	158
Figura 112. Conjuntos Seleccionados para la Variable de Salida	158
Figura 113. Conjuntos Difusos para la Temperatura	159
Figura 114. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo a acción del método, centro de gravedad ponderado por la altura	164
Figura 115. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, centro de gravedad ponderado por el área	165
Figura 116. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, media de centros	166
Figura 117. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderado por la altura	168
Figura 118. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderado por el área	169
Figura 119. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, centro de gravedad ponderado por la altura	171
Figura 120. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, centro de gravedad ponderado por el área	172
Figura 121. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, media de centros	173
Figura 122. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderados por la altura	175

Figura 123. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderados por el área	176
Figura 124. Respuesta del controlador difuso en el control de caudal	179
Figura 125. Respuesta del controlador PID en el control de caudal	180
Figura 126. Respuesta del controlador difuso en el control de Temperatura	182
Figura 127. Respuesta del controlador PID en el control de temperatura	183

LISTA DE ANEXOS

	pág.
Anexos Sintonización del controlador difuzo de Caudal	187
Anexos Sintonización del controlador difuzo de temperatura	192
Software Control difuso	198
Software Control PID	220
Instrucciones importantes utilizadas en los software de control desarrollados en Ambientes labwindows	228
Anexo Diseño controlador PID	232

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es analizar el comportamiento del control tradicional y el control difuso, aplicándolos en el control de caudal y temperatura a la carga de corriente de un intercambiador de calor, así como el análisis de distintos métodos de defuzzificación, utilizados en el momento en que se este realizando el control difuso.

Actuando sobre la estructura del controlador difuso se realizan algunos cambios de forma tal que este se sintonice para poder obtener la respuesta mas optima. De la misma manera se procede sobre el controlador tradicional, y de esta forma se establecen comparaciones sobre estos dos tipos de controles.

Dentro de los cambios que se realizan sobre el controlador difuso esta su forma de defuzzificar la información, es decir se permutan los métodos defuzzificación para luego realizar comparaciones sobre el comportamiento de cada uno de estos, y así poder tener bases para poder designar cual de todos es el mas optimo para un control de caudal y temperatura a la carga de corriente de un intercambiador de calor, de esta forma este informe que comenta y califica los tipos de controles industriales mas utilizados, se convierte en una ayuda para los lectores, tanto en alerta bibliográfica como en formación continuada.

INTRODUCCIÓN

Para todas aquellas personas interesadas en la aplicación del control se hace imprescindible el tener claro este concepto.

El control es un área que abarca mucho conocimiento, y para poder adquirir todo este saber se necesita de mucho tiempo y esfuerzo, pero todo este trabajo es en vano si no se lleva a la práctica toda la teoría que abarca el control de un sistema.

Desde que el estudiante, el investigador u otra persona, que desee realizar control, inicie con la elección del sistema que desea controlar, desde ese momento comienza la tarea de emplear algún tipo de control.

En muchos de los sectores de la industria en donde se cuente con procesos térmicos, es importantísima la presencia de un intercambiador de calor. Dichos procesos hacen parte de la vida cotidiana de un ingeniero que tiene como campo de acción el control, por lo tanto se considera interesante el realizar un control a este tipo de herramientas, y se valora la importancia de la experiencia que para la vida profesional como futuros ingenieros mecatrónicos que nos espera.

Este trabajo en su contenido estudia dos grandes aspectos: Una comparación entre el control tradicional y el control difuso, y un análisis entre algunos de los diferentes métodos de defuzzificación que se utilizan en la lógica difusa, haciendo un análisis de cada uno de ellos tomando en consideración los aportes que otros autores han hecho y dejando siempre en claro, que los resultados obtenidos solo serán aplicables al momento de hacer control sobre un intercambiador de calor.

Este informe servirá de guía a todo aquel que desee cumplir con una investigación que tenga relación con el tema "control de intercambiadores de calor", tanto en el campo estudiantil como en el profesional.

1. JUSTIFICACIÓN

Varios investigadores han estudiado comparativamente los métodos de defuzzificación o desemborronado. Es bastante generalizada la conclusión que el CDA, mas conocido como el método del centro de masa, es el de mejores resultados. No obstante se plantea que el MDM, conocido como el criterio de la media del máximo, da mejor comportamiento a estado de régimen estacionario. Por su parte Tong demostró que el CDA da menor error cuadrático que el MDM.

Como se puede observar algunos de los estudios del control difuso tienen diferentes puntos de vista y diferentes conclusiones, cuando se trata de definir el método de defuzzificación mas optimo al momento de controlar un sistema por medio de la lógica del control difuso.

Por todo lo anterior se hace necesario diseñar y realizar un control de temperatura y caudal a la entrada de la corriente de calentamiento de un intercambiador de calor, por medio de el cual se quiere realizar un estudio entre el control tradicional y el control difuso, y encontrar, entre los métodos de defuzzificación utilizados, aquel que cuente con las propiedades mas adecuadas, con el objetivo de permitir la mayor estabilidad y robustez del sistema. Pues es bien conocido que la estabilidad es uno de los requisitos con mayor importancia que deben cumplir todos los sistemas de control.

2. OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GENERAL

Diseñar y construir un sistema de control inteligente mediante el cual se pueda controlar la temperatura y el caudal en la entrada de la corriente de calentamiento de un intercambiador de calor, en el cual se pueda realizar un análisis comparativo entre algunos de los diferentes métodos de defuzzificación utilizados en el control fuzzy.

2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS

Seleccionar los diferentes métodos de defuzzificación que se utilizaran en el estudio comparativo, determinar sus principales ventajas y desventajas y hacer su implementación en el control a realizar.

Diseñar y elaborar un software de control difuso en el cual se pueda implementar los diferentes métodos de defuzzificación seleccionados.

Diseñar y elaborar un software de control tradicional.

Realizar un estudio por medio del cual se pueda efectuar el paralelo entre el control tradicional y el control difuso.

Diseñar y elaborar una plataforma de visualización de los datos de las variables a controlar (temperatura y caudal).

Seleccionar los sensores y los actuadores a utilizar en el sistema, teniendo en cuenta factores económicos, señales adquiridas entre otros.

Realizar el montaje del sistema con sus respectivos actuadores y sensores.

Elaborar la calibración del sistema.

3. MARCO TEORICO

3.1 INTERCAMBIADORES DE CALOR

El papel de los intercambiadores de calor ha adquirido una gran importancia ante la necesidad de ahorrar energía y disponer de equipos óptimos no sólo en función de su análisis térmico y del rendimiento económico de la instalación, sino también en función de otros factores como el aprovechamiento energético del sistema y la disponibilidad y cantidad de energía y de materias primas necesarias para cumplir una determinada función.

Desde el momento en que un intercambiador de calor se instala y pone en funcionamiento dentro de un proceso de transferencia térmica, se precisa un determinado gradiente de temperatura para que se pueda efectuar la transmisión del calor; la magnitud de este gradiente se puede reducir utilizando un intercambiador mayor, pero esto a su vez implica un mayor costo, tanto de tipo económico, como energético.

3.1.1 Tipos de intercambiadores de calor

Los intercambiadores de calor son tan importantes y tan ampliamente utilizados en la industria, que su diseño ha experimentado un gran desarrollo, existiendo en la actualidad normas ideadas y aceptadas por TEMA que especifican con detalle los materiales, métodos de construcción, técnicas de diseño y sus dimensiones.

El intercambiador de calor más sencillo se compone de un tubo dentro de otro tubo, este montaje de corrientes paralelas funciona, tanto en contracorriente como en equicorriente, circulando el fluido caliente o el frío a través del espacio anular, mientras que el otro fluido circula por la tubería interior.

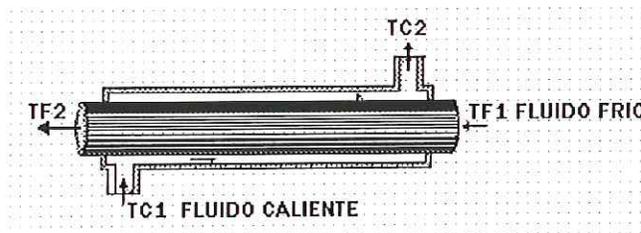


Figura 1. Intercambiador simple de tubos concéntricos

Intercambiador de paso simple: El intercambiador más sencillo que consta de dos tubos concéntricos, no es adecuado cuando el gasto másico es elevado. Si se utilizan varios tubos concéntricos en paralelo, el peso del material de los tubos que se necesita se haría tan grande, que es mucho más económico construirlos formando un conjunto de carcasa y tubos, de forma que se utiliza una carcasa común para muchos tubos; éste intercambiador, debido a que funciona con un solo paso de fluido en el lado de la carcasa y un solo paso de fluido en el lado de los tubos se denomina intercambiador de paso simple.

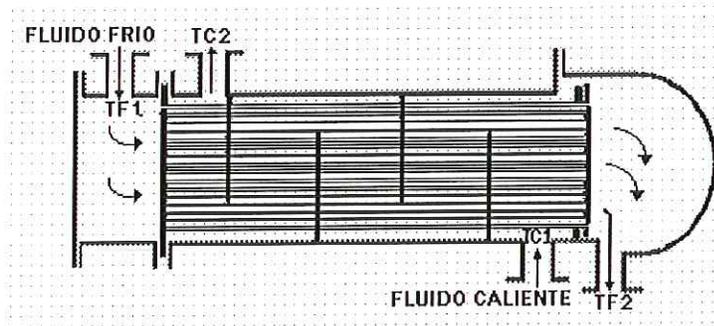


Figura 2. Intercambiador de carcasa y tubos de paso simple (con mezcla de los fluidos)

En este tipo de intercambiador, uno de los fluidos circula por el interior de los tubos, mientras que el otro fluido se ve forzado a circular entre la carcasa y la parte exterior de los tubos.

Cuando las temperaturas TC del fluido del lado caliente y TF del fluido del lado frío son variables de un punto a otro, a medida que el calor va pasando del fluido más caliente al más frío, la velocidad de intercambio térmico entre los fluidos también variará a lo largo del intercambiador, porque su valor depende, en cada sección, de la diferencia de temperaturas entre los fluidos caliente y frío.

En un flujo paralelo en equicorriente, la temperatura final del fluido más frío nunca puede llegar a ser igual a la temperatura de salida del fluido más caliente.

Sin embargo, en un flujo en contracorriente, la temperatura final del fluido más frío (que es el que se calienta) puede superar la temperatura de salida del fluido más caliente (que se enfría), puesto que existe un gradiente de temperaturas favorable a todo lo largo del intercambiador de calor.

En un intercambiador en contracorriente, los coeficientes de transmisión de calor del lado de la carcasa y del lado de los tubos deben ser del mismo orden de magnitud y ser grandes para obtener un coeficiente global satisfactorio. La velocidad y turbulencia del líquido del lado de la carcasa son tan importantes como las del líquido del lado de los tubos. Para evitar el debilitamiento de las placas tubulares es preciso mantener una distancia mínima entre los tubos, por lo que no resulta práctico colocar los tubos tan juntos que la sección libre para

el flujo del fluido por el exterior de los tubos sea tan pequeña, como la del interior de los mismos.

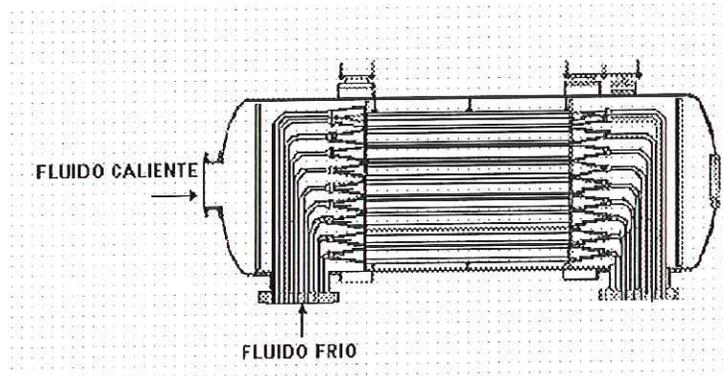


Figura 3. Intercambiador de carcasa y tubos de paso simple (sin mezcla de uno de los fluidos)

Si las dos corrientes son del mismo orden de magnitud, la velocidad del lado de la carcasa es menor que la del lado de los tubos; por esta razón se instalan placas deflectoras con el fin de disminuir la sección de flujo del líquido del lado de la carcasa y obligarlo a circular en dirección cruzada a la bancada de tubos en vez de hacerlo paralelamente a ellos; de esta forma se consigue un coeficiente de transferencia de calor más elevado en flujo cruzado que en circulación paralela a los tubos.

El flujo pasa perpendicularmente a los tubos, circulando hacia abajo en la primera sección, hacia arriba en la segunda, y así sucesivamente; la turbulencia adicional que se crea mediante este tipo de flujo aumenta el coeficiente de transmisión de calor del lado de la carcasa.

Las pantallas, (placas deflectoras), son discos circulares de una plancha metálica a los que se ha cortado, para estos intercambiadores, un cierto segmento circular de forma que la altura de este segmento sea igual a la cuarta parte del diámetro interior de la carcasa, por lo que las placas deflectoras así obtenidas se denominan placas del 25%, viniendo perforadas para recibir los tubos; para evitar fugas, o hacer que estas sean mínimas, las holguras entre las placas y la carcasa, y entre las placas y los tubos deben ser pequeñas. Este tipo de construcción resulta práctico solamente para carcasas pequeñas.

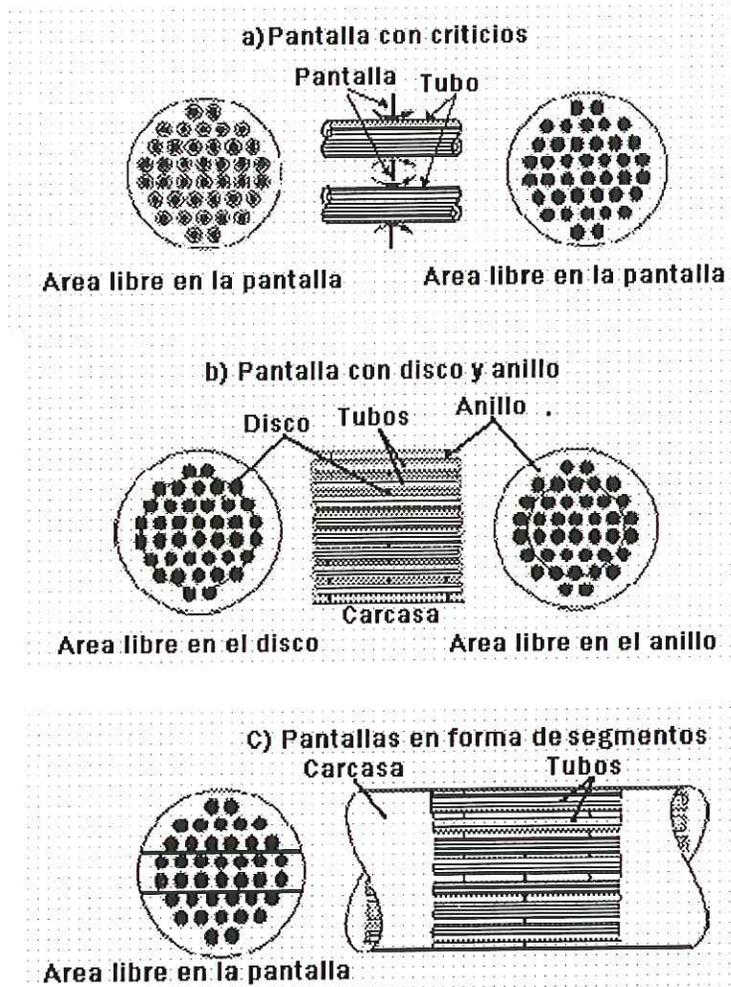


Figura 4. Pantallas utilizadas en los intercambiadores de carcasa y tubos

3.1.2 Eficacia de los intercambiadores de calor

En muchas situaciones lo único que se conoce es la descripción física del intercambiador, como el número y tamaño de los tubos, número de pasos de tubos, número de pasos por la carcasa, las temperaturas de entrada de los fluidos TC1 y TF1. Se puede obtener una ecuación de la transferencia de calor en la que no intervenga ninguna de las temperaturas de salida de los fluidos, haciendo uso del concepto de eficacia "e" del intercambiador que se define en la forma:

$$E = \frac{\text{Velocidad real de transferencia de calor en un intercambiador determinado}}{\text{Velocidad máxima posible de transferencia de calor}}$$

La eficiencia "e" compara la velocidad de transferencia térmica real, que es la absorbida por el fluido que se calienta, con la velocidad de transferencia

térmica máxima que podría transmitirse en un intercambiador en contracorriente de superficie de intercambio infinita, cuyos límites vienen impuestos por el Segundo Principio de la Termodinámica, que tiene en cuenta los focos térmicos, a las temperaturas extremas, el frío y el caliente.

3.2 DEFINICIONES DE CONTROL

Los instrumentos de control empleados en las industrias de proceso tales como química, petroquímica, alimenticia, metalúrgica, energética, textil, papel, etc, tienen su propia terminología; los términos empleados definen las características propias de medida y de control y las estáticas y dinámicas de los diversos instrumentos utilizados: Indicadores, registradores, controladores, transmisores y válvulas de control.

La terminología empleada se ha unificado con el fin de que los fabricantes, los usuarios y los organismos o entidades que intervienen directa o indirectamente en el campo de la instrumentación industrial empleen el mismo lenguaje.

3.2.1 Campo de medida (range)

Espectro o conjunto de valores de la variable medida que están comprendidos dentro de los límites superior e inferior de la capacidad de medida o de transmisión del instrumento; viene expresado estableciendo los dos valores extremos. Otro termino derivado es el de dinámica de medida o rangeabilidad (rangeability), que es el cociente entre el valor de medida superior e inferior de un instrumento.

3.2.2 Error

Es la diferencia algebraica entre el valor leído o transmitido por el instrumento y el valor real de la variable medida. Si el proceso está en condiciones de régimen permanente existe el llamado *error estático*. En condiciones dinámicas el error varía considerablemente debido a que los instrumentos tienen características comunes a los sistemas físicos: absorben energía del proceso y esta transferencia requiere cierto tiempo para ser transmitida, lo cual da lugar a retardos en la lectura del aparato.

Siempre que las condiciones sean dinámicas, existirá en mayor o menor grado el llamado *error dinámico* (diferencia entre el valor instantáneo de la variable y el indicado por el instrumento); su valor depende del tipo de fluido del proceso, de su velocidad, del elemento primario, de los medios de protección entre otros.

El *error medio* del instrumento es la medida aritmética de los errores en cada punto de la medida, determinados para todos los valores crecientes y decrecientes de la variable medida.

Cuando una medición se realiza con la participación de varios instrumentos, colocados unos a continuación de otros, el valor final de la medición estará constituido por los errores inherentes a cada uno de los instrumentos. Suele tomarse como error total de una medición de este tipo, como la raíz cuadrada de la suma algebraica de los cuadrados de los errores máximos de los instrumentos, es decir:

$$Error = \pm \sqrt{a^2 + b^2 + c^2 + \dots}$$

3.2.3 Incertidumbre de la medida (Uncertainty)

Los errores que existen necesariamente al realizar la medida de una magnitud, hacen que se tenga una incertidumbre sobre el verdadero valor de la medida. La incertidumbre es la dispersión de los valores que pueden ser atribuidos razonablemente al verdadero valor de la magnitud medida. En el cálculo de la incertidumbre intervienen la distribución estadística de los resultados de series de mediciones, las características de los equipos entre otros. Cuando se dispone de una sola medida, la incertidumbre es: $i = k\sigma$. Donde K es el valor que depende del nivel de confianza y σ es la desviación típica del instrumento indicada por el fabricante.

3.2.4 Exactitud

Es la cualidad de un instrumento de medida por la que tiende a dar lecturas próximas al verdadero valor de la magnitud medida.

3.2.5 Precisión (accuracy)

La precisión es la tolerancia de medida o de transmisión del instrumento (intervalo donde es admisible que se sitúe la magnitud de la medida), y defino los límites de los errores cometidos cuando el instrumento se emplea en condiciones normales de servicio durante un período de tiempo determinado. Hay varias formas para expresar la precisión:

- a) Tanto por ciento del alcance.
- b) Directamente, en unidades de la variable medida. Eje Prec. De ± 1.5 °C.

- c) Tanto por ciento de la lectura efectuada.
- d) Tanto por ciento del valor máximo del campo de medida.
- e) Tanto por ciento de la longitud de la escala.

La precisión varía en cada punto del campo de medida si bien, el fabricante la especifica en todo el margen del instrumento indicando a veces su valor en algunas zonas de la escala. Cuando se desee obtener la máxima precisión del instrumento en un punto determinado de la escala, puede calibrarse únicamente para este punto de trabajo, sin considerar los valores restantes del campo de medida.

Hay que señalar que los valores de precisión de un instrumento se consideran en general establecidos para el usuario, es decir, son los proporcionados por los fabricantes de los instrumentos. Sin embargo estos últimos suelen considerar también los valores de calibración en fábrica y de inspección.

3.2.6 Zona muerta (dead zone o dead band)

Es el campo de valores de la variable que no hace variar la indicación o la señal de salida del instrumento, es decir, que no produce su respuesta. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

3.2.7 Sensibilidad (sensitivity)

Es la razón entre el incremento de la lectura y el incremento de la variable que lo ocasiona, después de haberse alcanzado el estado de reposo. Viene dada en tanto por ciento del alcance de la medida.

3.2.8 Histéresis (hysteresis)

La histéresis es la diferencia máxima que se observa en los valores indicados por el índice o la pluma del instrumento para el mismo valor cualquiera del campo de medida, cuando la variable recorre toda la escala en los dos sentidos, ascendente y descendente. Se expresa en tanto por ciento del alcance de la medida.

3.2.9 Ruido

Cualquier perturbación eléctrica o señal accidental no deseada que modifica la transmisión, indicación o registro de los datos deseados.

3.2.10 Estabilidad

Capacidad de un instrumento para mantener su comportamiento durante su vida útil y de almacenamiento especificadas.

3.3 MEDIDAS DE CAUDAL

En la mayor parte de las operaciones realizadas en los procesos industriales y en las efectuadas en laboratorio y en plantas piloto es muy importante la medición de los caudales de líquidos o de gases. Existen varios métodos para medir el caudal según sea el tipo de caudal volumétrico o másico deseado.

3.3.1 Rotámetros

Los rotámetros son medidores de caudal de área variable en los cuales un flotador cambia su posición dentro de un tubo, proporcionalmente al flujo del fluido. Las fuerzas que actúan sobre el flotador se representan en la siguiente figura:

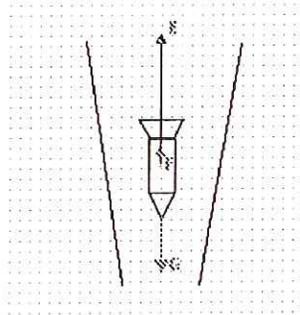


Figura 5. Fuerzas que actúan sobre el flotador de un rotámetro

$$G = V_f Q_f g \quad F = V_f Q_l g \quad E = C_d Q_l A_f \frac{v^2}{g} \quad F + E = G$$

Donde: G = Peso del flotador, V_f = Volumen del flotador, Q_f = Densidad del flotador, Q_l = Densidad del fluido, E = Fuerza de arrastre del fluido sobre el flotador, F = Fuerza de empuje del fluido sobre el flotador, C_d = Coeficiente de

arrastre del fluido sobre el flotador, v = Velocidad del fluido, A_f = Área de la sección del flotador, A_w = Sección interior del tubo.

El valor de C_d depende de la viscosidad del fluido; el rotámetro al ser un diafragma de orificio variable tendrá como éste, un coeficiente de descarga que englobará el reparto desigual de velocidades, la contracción de la vena del fluido, las rugosidades de la tubería, entre otros.

Resolviendo las ecuaciones anteriores, resulta:

$$v = C \sqrt{\frac{2gV_f(Q_f - Q_l)}{Q_l A_f}}$$

Como el caudal es igual a $Q_v = v \cdot A_w$ entonces

$$Q_v = A_w * C \sqrt{\frac{2gV_f(Q_f - Q_l)}{Q_l A_f}}$$

Esta fórmula permite determinar el caudal del fluido que pasa a través de un rotámetro conocido, Este caudal depende evidentemente del peso específico del líquido y de los valores de la sección interior del tubo A_w , ya que la misma cambia según sea el punto de equilibrio del flotador, Por estos motivos la selección del tamaño de un rotámetro es laboriosa y es conveniente emplear algún método que simplifique los cálculos anteriores.

Con el fin de normalizar los cálculos se acostumbra a referir los caudales del líquido o del vapor a sus equivalentes en agua y aire respectivamente. El caudal equivalente en agua es igual:

$$Q_{agua} = A_w * C \sqrt{\frac{2gV_f(8.04 - 1)}{1 * A_f}}$$

Considerando un flotador de acero inoxidable de densidad 8.04.

Las fórmulas anteriores o bien reglas de cálculo especiales permiten determinar rápidamente los caudales equivalentes en agua o en aire del fluido, y de aquí, el tamaño del rotámetro consultando las tablas del fabricante. Estas dan el tamaño, el número del tubo y el del flotador con su forma y peso.

Los tubos empleados en los rotámetros pueden ser de vidrio y metálicos, Los fabricantes los mecanizan de tal modo que queda asegurada la intercambiabilidad de los diversos tubos y flotadores a fin de obtener caudales correspondientes sin necesidad de calibrar individualmente el rotámetro.

Los tubos de vidrio pueden ser con nervios interiores que sirven para guiar el flotador o bien lisos. Los tubos metálicos son siempre cónico lisos y precisan de extensión por no tener una lectura directa.

Los tubos tienen una conicidad que viene expresada como la relación entre el diámetro interno del tubo en la escala máxima y el diámetro de la cabeza del flotador, Esta relación varía entre 1.2 a 1.35.

Los flotadores pueden tener varios perfiles de construcción:

- a) Esférico: para bajos caudales y poca precisión, con una influencia considerable de la viscosidad del fluido.
- b) Cilíndrico con borde plano: Para caudales medios y elevados con una influencia media de la viscosidad del fluido.
- c) Cilíndrico con borde saliente de cara inclinada contra el flujo: Con menor influencia de la viscosidad que, por sus características de caudal, puede compararse a una tobera.
- d) Cilíndrico con bordes salientes contra el flujo: Con la mínima influencia de la viscosidad del fluido, que por su funcionamiento, puede compararse a una placa-orificio o diafragma.

Hay que señalar que la amplitud de medida de los rotámetros es de 10 a 1; la pérdida de carga del rotámetro es constante en todo el recorrido del flotador y puede hacerse muy baja mediante una forma adecuada de éste.

La pérdida de carga del flotador puede determinarse a partir de la expresión siguiente que relaciona el peso efectivo del flotador con su sección transversal máxima:

$$\Delta p = \frac{G_f V_f Q_f g}{A_T}$$

Expresión en la que: G = Peso del flotador, V_f = Volumen del flotador
Q_f = Densidad del fluido, A_T = Sección transversal máxima del flotador.

A esta pérdida de carga hay que sumar la debida a las conexiones y al tubo para obtener la pérdida de carga total. El valor aproximado de esta es el doble de la del flotador.

La calibración de los rotámetros se consigue básicamente manteniendo constante el paso de un caudal a través del rotámetro y midiendo la cantidad de líquido o de gas recogido en un tiempo dado medido con precisión.

En los líquidos, los aparatos de medida del volumen suelen ser buretas graduadas o básculas mientras que en los gases se suelen utilizar gasómetro y calibradores, graduados con sello de mercurio. Para medir el tiempo se emplean cronómetros capaces de medir 0.01 segundos como mínimo.

3.3.2 Medidores de caudal tipo flotador svk

Los medidores de caudal Tipo flotador SVK son notables por su simplicidad y flexibilidad. Los caudales de aceite, agua y líquidos similares al agua pueden ser así medidos y ser monitoreados rápidamente. Los instrumentos SVK funcionan en base a un principio muy simple y son fáciles de montar. El medio atraviesa una apertura anular creada por el calibre del cilindro y el cono, y produce una diferencia de la presión que fuerza al pistón contra un resorte calibrado. El movimiento del pistón es directamente proporcional al caudal.

Áreas de aplicación:

- Industria Química
- Procesos de Ingeniería
- Tecnología Solar
- Industria de Automóviles
- Industria de Alimentos

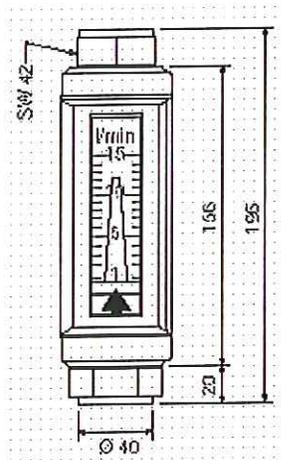


Figura 6. Medidor de Caudal tipo Flotador

3.3.3 Medidores de caudal tipo paleta

Los nuevos medidores de caudal KOBOLD del tipo DPR trabajan según el principio de la placa de baffle. Una longitud de montaje muy pequeña de solamente 50 milímetros se puede implementar con la construcción de emparedado. Una placa (semicircular) se sujeta a un eje rotativo en el anillo grueso de 50 milímetros.

El ángulo entre la placa y el anillo cambia según el rendimiento de procesamiento del caudal. Un acoplador magnético permanentemente adjunto transfiere el movimiento a un indicador externo. Un resorte de torsión fuerza la placa de baffle de nuevo a su posición original cuando el rendimiento de

procesamiento del caudal disminuye. Los dispositivos pueden, por tanto, ser instalados en cualquier posición.

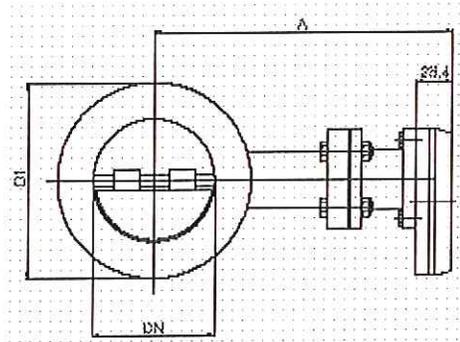


Figura 7. Medidor de Caudal tipo Paleta

3.4 MEDIDA DE TEMPERATURA

La medida de temperatura constituye una de las mediciones más comunes y más importantes que se efectúan en los procesos industriales. Las limitaciones del sistema de medida quedan definidas en cada tipo de aplicación por la precisión, por la velocidad de captación de la temperatura, por la distancia entre el elemento de medida y el aparato receptor y por el tipo de instrumento indicador, registrador o controlador necesarios; es importante señalar que es esencial una comprensión clara de los distintos métodos de medida con sus ventajas y desventajas propias para lograr una selección óptima del sistema más adecuado.

3.4.1 TERMOPARES O TERMOCUPLAS

Una termocupla es un sensor para medir temperatura. Consiste en dos cables de metales distintos, conectados en un extremo donde se produce un pequeño voltaje asociado a una temperatura. Ese voltaje es medido por un termómetro de termocupla.

Las mediciones de temperatura que utilizan termocuplas o termopares se basan en el descubrimiento hecho por Seebeck en 1821. Este se puede resumir de la siguiente manera: una corriente fluye en un circuito continuo de dos alambres de distintos metales A y B, si las conexiones o uniones se encuentran a temperaturas distintas. La corriente será proporcional a la diferencia de temperatura entre las dos uniones.

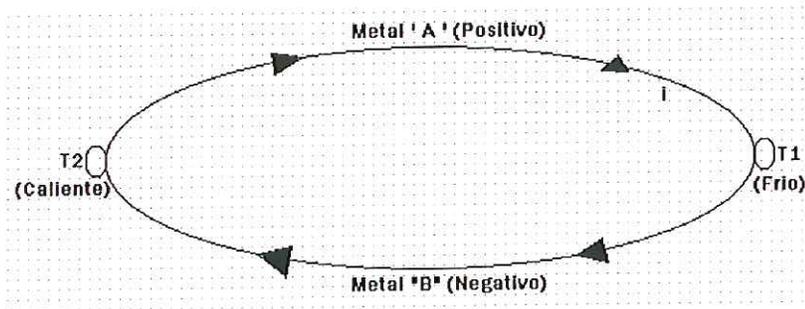


Figura 8. Diagrama de una termocupla

La figura despliega una termocupla, donde los cables metálicos A y B son distintos (de cobre y de constantan, por ejemplo), T_1 y T_2 son dos temperaturas distintas; la letra "i" representa la corriente que fluye cuando $T_1 < T_2$.

Esta circulación de corriente obedece a dos efectos termoeléctricos combinados, el efecto Peltier que provoca la liberación o absorción de calor en la unión de dos metales distintos cuando una corriente circula a través de la unión apareciendo una fuerza electromotriz [fem]; y el efecto Thomson que consiste en la liberación o absorción de calor cuando una corriente circula a través de un metal homogéneo en el que existe un gradiente de temperaturas entre los cuales aparecerá una fem. Esta fem no depende de la distancia entre los puntos. Sólo de la diferencia de las temperaturas.

La combinación de los dos efectos, es la causa de la circulación de corriente al cerrar el circuito en el termopar. Esta corriente puede calentar el termopar y afectar la precisión en la medida de la temperatura, por lo que durante la medición debe hacerse mínimo su valor.

Estudios realizados sobre el comportamiento de termopares han permitido establecer tres leyes fundamentales:

1. Ley del circuito homogéneo. En un conductor metálico homogéneo no puede sostenerse la circulación de una corriente eléctrica por la aplicación exclusiva de calor.
2. Ley de los metales intermedios. Si en un circuito de varios conductores la temperatura es uniforme desde un punto de soldadura A, a otro punto B, la suma algebraica de todas las fuerzas electromotrices es totalmente independiente de los conductores metálicos intermedios y es la misma que si se pusieran en contacto directo A y B.
3. Ley de las temperaturas sucesivas. La fuerza electromotriz (f.e.m.) generada por un termopar con sus uniones a las temperaturas T_1 y T_3 es la suma algebraica de la f.e.m. del termopar con sus uniones a T_1 y T_2 y de la f.e.m. del mismo termopar con sus uniones a las temperaturas T_2 y T_3 .

Por estas leyes se hace evidente que en el circuito se desarrolla una pequeña tensión continua proporcional a la temperatura de la unión de medida, siempre que haya una diferencia de temperaturas con la unión de referencia. La selección de los alambres para los termopares se hace de forma que tengan una resistencia adecuada a la corrosión, a la oxidación, a la reducción y a la cristalización, que desarrollen una f.e.m. relativamente alta, que sean estables, de bajo coste y de baja resistencia eléctrica y que la relación entre la temperatura y la f.e.m. sea tal que el aumento de ésta se aproximadamente paralelo al aumento de temperatura.

El termopar tipo K, de cromel-Alumel, se recomienda en atmósferas oxidantes y a temperaturas de trabajo entre -270 y 1250 °C. No debe ser utilizado en atmósferas reductoras ni sulfurosas a menos que esté protegido con un tubo de protección.

El material del tubo de protección o vaina debe ser adecuado para el proceso donde se aplica y suele ser de hierro, acero sin soldadura, acero inoxidable, inconel, cerámico, carburo de silicio, etc.

Cuando el termopar está instalado a una distancia larga del instrumento, no se conecta directamente al mismo, sino por medio de un cable de extensión; los cables de extensión son conductores con propiedades eléctricas similares a las del termopar hasta ciertos límites de temperatura (0 - 200°C) y son más económicos. Se suelen utilizar los siguientes:

- a. Conductores tipo K o tipo T para termopares tipo K.
- b. Conductores tipo J para termopares tipo J.
- c. Conductores T para termopares tipo T.

Las conexiones entre el cable de compensación, el termopar y el instrumento deben ser perfectas, sin empalmes en el cable de compensación, utilizando el hilo correcto y el conjunto de la instalación debe evitar el paso próximo por fuentes de calor. Si estas recomendaciones no se cumplen, aparecen tensiones térmicas de corriente continua que dan lugar a un desplazamiento en la calibración del instrumento.

El termopar es susceptible al ruido eléctrico industrial debido a que durante su funcionamiento puede generar tensiones de 2 a 50 mV y se encuentran en un entorno donde las grandes máquinas eléctricas pueden crear cientos de milivoltios en el cable de conexión. Por otro lado, el termopar, trabajando como una antena, puede recoger radiación electromagnética de radio, TV y microondas. De aquí que se requiera que los cables de conexión estén torcidos y dentro de una funda metálica que se pone a tierra, que la unión de medida esté puesta a tierra, y que el amplificador tenga una buena relación señal/ruido.

Existen distintas combinaciones de metales o calibraciones respectivas. Los cuatro tipos más típicos son J, K, T y E. Cada calibración tiene distinto rango de temperatura y ambiente, aunque la temperatura máxima varía con el diámetro del cable usado en la termocupla. Ya que las termocuplas pueden medir amplios rangos de temperatura y son bastante resistentes, son muy usadas en la industria. Los siguientes criterios pueden ser útiles para definir los tipos de termocupla a utilizar:

- Rango de temperatura que desea cubrir
- Resistencia química de la termocupla
- Resistencia a vibraciones
- Requerimientos de instalación

Las calibraciones más comunes son las siguientes:

Tabla 1. Calibraciones más usuales de las termocuplas

Tipo de Termocupla	Rango en °C	Rango en mV
Hierro-Constantan (J)	- 250 °C a + 1000 °C	+ 51.9 °C a + 900 °C
Cromel-Alumel (K)	+ 500 °C a + 1250 °C	+ 32.4 °C a + 800 °C
Cobre-Constantan (T)	- 250 °C a + 600 °C	+ 33.6 °C a + 600 °C
Cromel-Constantan (E)	+ 300 °C a + 1000 °C	+ 300 °C a + 1000 °C

A continuación se representan curvas de relación entre F.E.M vs Temperatura de las termocuplas más usuales:

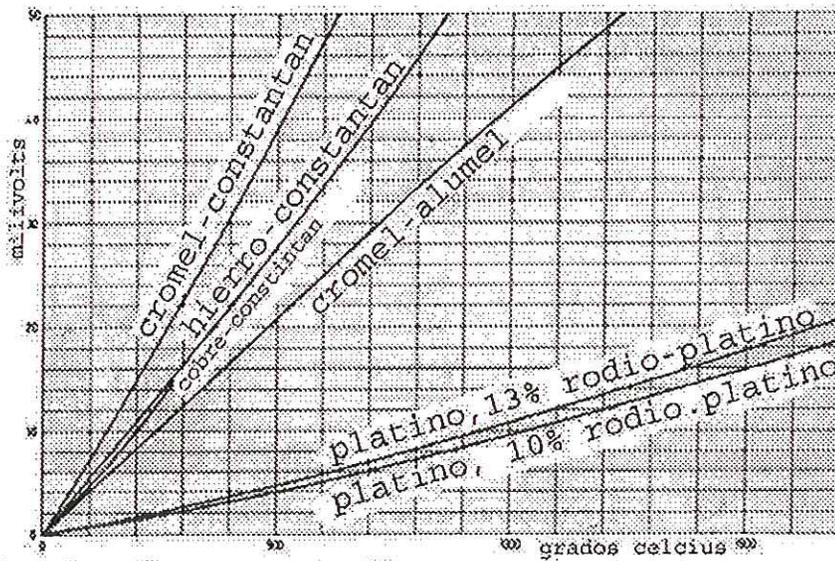


Figura 9. Curvas de relación entre f.e.m vs temperatura de las termocuplas más usuales

Por su naturaleza, las termocuplas presentan una resistencia prácticamente nula y su capacidad de generar potencia es muy débil. El amplificador a utilizar debe solicitar el mínimo posible de corriente desde la termocupla.

Velocidad de respuesta de los instrumentos de termopares: La constante de tiempo de un instrumento es el tiempo necesario para que alcance el 63.2% de la variación total de temperatura que experimenta. Es decir, si un instrumento cuya sonda o elemento primario pasa de un recinto de 70°C a otro de 270°C puede alcanzar el 63.2% de la diferencia $270 - 70 = 200^\circ\text{C}$ en 0.1 segundos; este será la constante de tiempo de la medida con el instrumento.

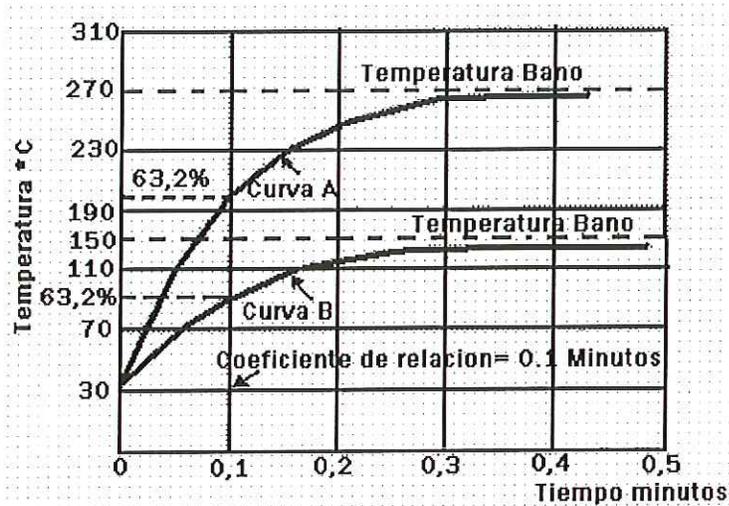


Figura 10. Velocidad de respuesta de un termopar

La constante de tiempo de un sistema de bulbo y capilar dependerá de la longitud y el diámetro interno del tubo capilar y del volumen del elemento receptor.

Los termómetros de bulbo y capilar rellenos de mercurio y de líquido tienen una respuesta muy rápida por la incompresibilidad del fluido que los llena; en cambio, los termómetros de gas y de vapor tienen un retardo más acusado a causa de la compresibilidad del fluido interno.

Los elementos primarios eléctricos, sondas de resistencia, termistores, termopares, y pirómetros de radiación se caracterizan porque el tiempo de respuesta depende únicamente del intercambio térmico entre el fluido y el elemento, ya que la corriente eléctrica circula por los cables de conexión a la velocidad de la luz, directamente al receptor.

En el termopar, dos hilos soldados en un extremo constituyen la masa a calentar, la que depende de la galga o diámetro de los hilos y de la forma de la soldadura, hilo torcido o soldado a tope.

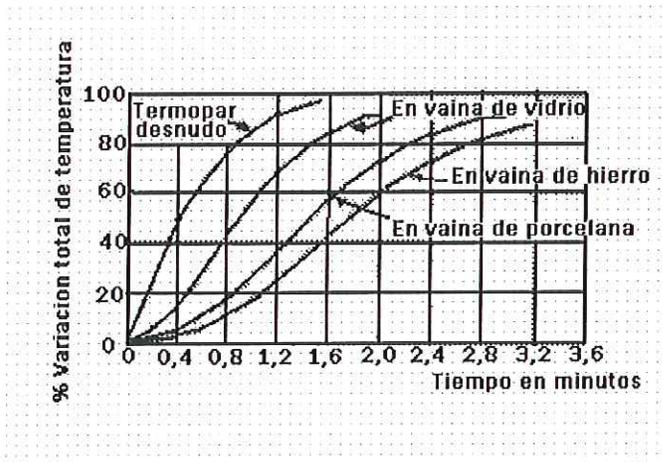


Figura 11. Respuesta de un termopar con vainas diferentes

Los elementos de temperatura están normalmente inmersos en vainas termométricas o en tubos de protección para tener así una protección mecánica o bien estar aislados del fluido cuya temperatura miden. La vaina se emplea para altas temperaturas y presiones y el espesor de sus paredes es mayor que el de los tubos de protección, por lo cual, lógicamente, su velocidad de respuesta será menor que el de éstos.

Por otro lado, las vainas o tubos deben tener un diámetro interior en el cual ajusten perfectamente los elementos; de este modo se consigue que la transmisión térmica se realice casi exclusivamente por conducción a través de las paredes sin que exista un volumen apreciable de aire que dé lugar a una transmisión intermedia por convección.

Hay que señalar que cuando las temperaturas de trabajo son relativamente bajas puede introducirse en el extremo interior de la vaina o del tubo una grasa especial de alta conducción calorífica o bien aceite, que colaboran eficazmente en la obtención de una respuesta muy rápida del sistema.

Se recomienda prescindir de las vainas o tubos de protección para eliminar el retardo considerable que presentan a la transmisión de la temperatura.

Otros factores que influyen en la respuesta son la clase de fluido que rodea al elemento y la velocidad de circulación, cuanto mayor sea esta última tanto mayor será el suministro de calor del fluido al elemento de temperatura. La profundidad de la inmersión tiene también su importancia. Si es insuficiente, no permite una respuesta suficientemente rápida y existe el riesgo de un error dinámico importante.

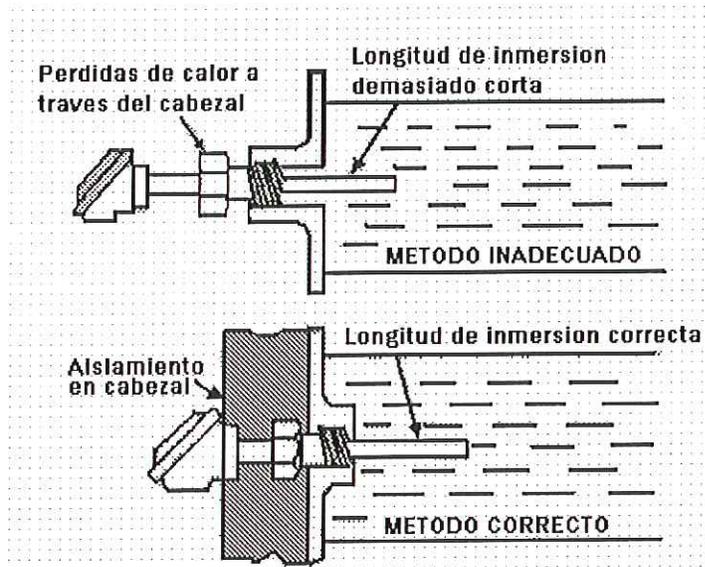


Figura 12. Instalación de una vaina o tubo de protección

El error dinámico es inherente a toda medida, ya que siempre se transfiere energía entre el fluido y el elemento.

3.5 ELEMENTOS FINALES DE CONTROL (VÁLVULAS)

Una válvula se puede definir como un aparato mecánico con el cual se puede iniciar, detener o regular la circulación de líquidos o gases mediante una pieza movable que abre, cierra u obstruye en forma parcial uno o más orificios o conductos.

Las válvulas son unos de los instrumentos de control más esenciales en la industria. Debido a su diseño y materiales, las válvulas pueden abrir y cerrar, conectar y desconectar, regular, modular o aislar una enorme serie de líquidos y gases, desde los más simples hasta los más corrosivos o tóxicos. Realiza la función de variar un caudal del fluido de control que modifica a su vez el valor de la variable medida comportándose como un orificio de área continuamente variable. Dentro del bucle de control tiene tanta importancia como el elemento primario, el transmisor y el controlador.

La válvula automática de control generalmente constituye el último elemento en un lazo de control instalado en la línea de proceso y se comporta como un orificio cuya sección de paso varía continuamente con la finalidad de controlar un caudal en una forma determinada.

Las válvulas de control constan básicamente de dos partes que son: la parte motriz o actuador y el cuerpo.

Actuador: el actuador también llamado accionador o motor, puede ser neumático, eléctrico o hidráulico, pero los más utilizados son los dos primeros, por ser las más sencillas y de rápida actuaciones.

Aproximadamente el 90% de las válvulas utilizadas en la industria son accionadas neumáticamente. Los actuadores neumáticos constan básicamente de un diafragma, un vástago y un resorte. Lo que se busca en un actuador de tipo neumático es que cada valor de la presión recibida por la válvula corresponda a una posición determinada del vástago. Teniendo en cuenta que la gama usual de presión es de 3 a 15 lbs/pulg² en la mayoría de los actuadores se selecciona el área del diafragma y la constante del resorte de tal manera que un cambio de presión de 12 lbs/pulg², produzca un desplazamiento del vástago igual al 100%.

El cuerpo: El cuerpo de la válvula contiene en su interior el obturador y los asientos y está provisto de rosca o de bridas para conectar la válvula a la tubería. El obturador es quien realiza la función de control de paso del fluido y puede actuar en la dirección de su propio eje o bien tener un movimiento rotativo. Está unido a un vástago que pasa a través de la tapa del cuerpo y que es accionado por el servomotor.

El cuerpo de la válvula debe resistir la temperatura y la presión del fluido sin pérdidas, tener un tamaño adecuado para el caudal que debe controlar y ser resistente a la erosión o a la corrosión producida por el fluido. El cuerpo y las conexiones a la tubería están normalizados de acuerdo con las presiones y temperaturas de trabajo en las normas DIN y ANSI, entre otras. El cuerpo suele ser de hierro, acero inoxidable y en casos especiales los materiales pueden ser de monel, hastelloy B o C.

Tapa de la válvula: La tapa de la válvula de control tiene por objeto unir el cuerpo al servomotor. A su través desliza el vástago del obturador accionado por el motor, Este vástago dispone generalmente de un índice que señala en una escala la posición de apertura o de cierre de la válvula.

Para que el fluido no se escape a través de la tapa es necesario disponer una caja de empaquetadura entre la tapa y el vástago, La empaquetadura ideal debe ser elástica, tener un bajo coeficiente de rozamiento, ser químicamente inerte y ser un aislante eléctrico, con el fin de no formar un puente galvánico con un vástago que del lugar a una corrosión de partes de la válvula.

Partes internas de una válvula (obturador y asientos): Como partes internas de la válvula se consideran generalmente las piezas metálicas internas desmontables que están en contacto directo con el fluido. Estas piezas son el vástago, la empaquetadura, el collarín de lubricación en la empaquetadura, los anillos de guía del vástago, el obturador y el asiento o los asientos. Hay que señalar que el obturador y el asiento constituyen el corazón de la válvula al controlar el caudal gracias al orificio de paso variable que forman al variar su posición relativa, y que además tienen la misión de cerrar el paso del fluido.

Para la selección del obturador y de los asientos intervienen tres puntos principales:

1. Materiales normales y los especiales aptos para contrarrestar la corrosión, la erosión y el desgaste producido por el fluido. El obturador y los asientos se fabrican normalmente en acero inoxidable porque este material es muy resistente.
2. Características del caudal en función de la carrera. El obturador determina la característica de caudal de la válvula; es decir, la relación que existe entre la posición del obturador y el caudal de paso del fluido.
3. Tamaño normal o reducido que permite obtener varias capacidades de caudal de la válvula con el mismo tamaño del cuerpo.

3.5.1 TIPOS DE VALVULAS

Debido a las diferentes variables, no puede haber una válvula universal; por tanto, para satisfacer los cambiantes requisitos de la industria se han creado innumerables diseños y variantes con el paso de los años, conforme se han desarrollado nuevos materiales.

Todos los tipos de válvulas recaen en nueve categorías: válvula de globo, válvula de compuerta, válvula de mariposa, válvula de bola, válvula de apriete, válvula de diafragma, válvula de macho, válvula de retención y válvula de desahogo (alivio).

Válvula de globo: Estas válvulas pueden ser de simple asiento, de doble asiento y de obturador equilibrado. Las de simple asiento precisan de un actuador de mayor tamaño para que el obturador cierre en contra de la presión diferencial del proceso. Por lo que se emplean cuando la presión del fluido es baja y se precisa que las fugas en posición de cierre sean mínimas.

En las válvulas de doble asiento o de obturador equilibrado la fuerza de desequilibrio desarrollada por la presión diferencial a través del obturador es menor que en la válvula de simple asiento, por este motivo se emplea en válvulas de gran tamaño o bien cuando deba trabajarse con una alta presión diferencial.

El cuerpo de la válvula tiene una cavidad interna esférica que alberga un obturador en forma de esfera o de bola. La bola tiene un corte adecuado (usualmente en V) que fija la curva característica de la válvula, y gira transversalmente accionada por un servomotor exterior. El cierre estanco se logra con un aro de teflón incorporado al cuerpo contra el cual asienta la bola cuando la válvula está cerrada.

En posición de apertura total, la válvula equivale aproximadamente en tamaño a 75% del tamaño de la tubería. La válvula de bola se emplea principalmente en el control de caudal de fluidos, o bien de fluidos con gran porcentaje de sólidos en suspensión.

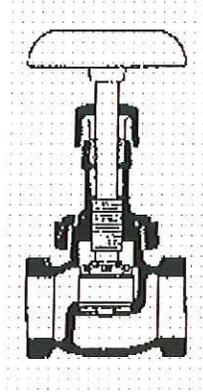


Figura 13. Válvula de globo

Recomendada para:

- Estrangulación o regulación de circulación.
- Para accionamiento frecuente.
- Para corte positivo de gases o aire.
- Cuando es aceptable cierta resistencia a la circulación.

Aplicaciones:

- Servicio general, líquidos, vapores, gases, corrosivos, pastas semilíquidas.

Ventajas:

- Estrangulación eficiente con estiramiento o erosión mínimos del disco o asiento.
- Carrera corta del disco y pocas vueltas para accionarlas, lo cual reduce el tiempo y desgaste en el vástago y el bonete.
- Control preciso de la circulación.
- Disponible con orificios múltiples.

Desventajas:

- Gran caída de presión.
- Costo relativo elevado.

Variaciones:

- Normal, en "Y", en ángulo, de tres vías.

Materiales:

- Cuerpo: bronce, hierro, hierro fundido, acero forjado, Monel, acero inoxidable, plásticos.
- Componentes: diversos.

Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento:

- Instalar de modo que la presión este debajo del disco, excepto en servicio con vapor a alta temperatura.
- Registro en lubricación.
- Hay que abrir ligeramente la válvula para expulsar los cuerpos extraños del asiento.
- Apretar la tuerca de la empaquetadura, para corregir de inmediato las fugas por la empaquetadura.

Válvula de Mariposa: El cuerpo está formado por un anillo cilíndrico dentro del cual gira transversalmente un disco circular. La válvula puede cerrar herméticamente mediante un anillo de goma encastrado en el cuerpo. Un servomotor exterior acciona el eje de giro del disco y ejerce su par máximo cuando la válvula está totalmente abierta, siempre que la presión diferencial permanezca constante. Las válvulas de mariposa se emplean para el control de grandes caudales de fluidos a baja presión.



Figura 14. Válvula de mariposa

Recomendada para:

- Servicio con apertura total o cierre total.
- Servicio con estrangulación.
- Para accionamiento frecuente.
- Cuando se requiere corte positivo para gases o líquidos.
- Cuando solo se permite un mínimo de fluido atrapado en la tubería.
- Para baja caída de presión a través de la válvula.

Aplicaciones:

- Servicio general, líquidos, gases, pastas semilíquidas, líquidos con sólidos en suspensión.

Ventajas:

- Ligera de peso, compacta, bajo costo.
- Requiere poco mantenimiento.
- Numero mínimo de piezas móviles.
- No tiene bolas o cavidades.
- Alta capacidad.
- Circulación en línea recta.
- Se limpia por si sola.

Desventajas:

- Alta torsión para accionarla.
- Capacidad limitada para caída de presión.
- Propensa a la cavitación.

Variaciones:

- Disco plano, disco realzado, con brida, atornillado, con camisa completa, alto rendimiento.

Materiales:

- Cuerpo: hierro, hierro dúctil, aceros al carbono, acero forjado, aceros inoxidables, aleación 20, bronce, Monel.
- Disco: todos los metales; revestimientos de elastómeros como TFE, Kynar, Buna-N, neopreno, Hypalon.
- Asiento: Buna-N, viton, neopreno, caucho, butilo, poliuretano, Hypalon, Hycar, TFE.

Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento:

- Se puede accionar con palanca, volante o rueda para cadena.
- Dejar suficiente espacio para el movimiento de la manija, si se acciona con palanca.
- Las válvulas deben estar en posición cerrada durante el manejo y la instalación.

Válvula de bola: Las válvulas de bola son de $\frac{1}{4}$ de vuelta, en las cuales una bola taladrada gira entre asientos elásticos, lo cual permite la circulación directa en la posición abierta y corta el paso cuando se gira la bola 90° y cierra el conducto.

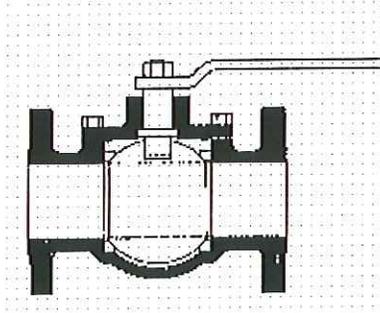


Figura 15. Válvula de bola

Recomendada para:

- Para servicio de conducción y corte, sin estrangulación.
- Cuando se requiere apertura rápida.
- Para temperaturas moderadas.
- Cuando se necesita resistencia mínima a la circulación.

Aplicaciones:

- Servicio general, altas temperaturas, pastas semilíquidas.

Ventajas:

- Bajo costo.
- Alta capacidad.
- Corte bidireccional.
- Circulación en línea recta.
- Pocas fugas.
- Se limpia por si sola.
- Poco mantenimiento.
- No requiere lubricación.
- Tamaño compacto.
- Cierre hermético con baja torsión.

Desventajas:

- Características deficientes para estrangulación.
- Alta torsión para accionarla.
- Susceptible al desgaste de sellos o empaquetaduras.
- Propensa a la cavitación.

Variaciones:

- Entrada por la parte superior, cuerpo o entrada de extremos divididos, tres vías, Venturi, orificio de tamaño total, orificio de tamaño reducido.

Materiales:

- Cuerpo: hierro fundido, hierro dúctil, bronce, latón, aluminio, aceros al carbono, aceros inoxidable, titanio, tántalo, zirconio; plásticos de polipropileno y PVC.
- Asiento: TFE, TFE con llenador, Nylon, Buna-N, neopreno.

Instrucciones especiales para instalación y mantenimiento:

- Dejar suficiente espacio para accionar una manija larga.

Válvulas de C_v o carrera ajustable: Existen válvulas de control con el coeficiente C_v ajustable con una relación que llega a 100:1. En estas válvulas se limita en un valor ajustable la carrera del obturador, con lo que se reduce el valor de C_v , pero se mantiene la misma señal de control de 4-20 mA en toda la carrera ajustada de la válvula, aumentando así la sensibilidad y, por lo tanto, la resolución. En otras palabras, puede variarse la ganancia (G_v) de la válvula.

$$G_v = \frac{\text{var iacion de la carrera}}{\text{var iacion de la señal de control (16mA)}}$$

Adaptándola así al proceso, lo que facilita que el controlador regule con una menor banda proporcional y una menor acción integral, aumentando así la estabilidad del lazo de control.

La necesidad universal de normalizar las dimensiones de las válvulas, no sólo en cuanto a tamaño sino también en cuanto a capacidad de paso del fluido ha llevado a los fabricantes y a los usuarios a adoptar un coeficiente que refleja y representa la capacidad de las válvulas de control.

El primer coeficiente de dimensionamiento de válvula, que se utilizó fue el denominado C_v , que se define como Caudal de agua en galones por minuto que pasa a través de la válvula en posición completamente abierta y con una pérdida de carga de una libra por pulgada cuadrada.

3.5.2 RUIDO EN LAS VALVULAS DE CONTROL

En las industrias de proceso intervienen muchos factores que contribuyen al mantenimiento de altos niveles de ruido, entre los cuales, uno de los más importantes es el generado durante el funcionamiento de las válvulas de control instaladas en tuberías que transportan líquidos, gases y vapores.

El cálculo del nivel de ruido de las válvulas de control es un problema que no puede resolverse actualmente en forma precisa debido al desconocimiento del valor de los distintos parámetros que intervienen.

La predicción del nivel de ruido se hace empíricamente tomando como bases los múltiples datos tomados en el laboratorio.

Causas del ruido en las válvulas: La alta velocidad de los fluidos en las tuberías es una causa importante del ruido en las válvulas. Tres son las causas principales del ruido:

- **La vibración Mecánica:** Es debida a las fluctuaciones de presión casuales que se producen dentro del cuerpo de la válvula y al choque del fluido contra las partes móviles de la misma.

- **El ruido hidrodinámico:** Es producido por los líquidos al circular a través de la válvula, pudiendo encontrarse en varios estados; sin cavitación, con cavitación, con vaporización, que se representan en la curva que relaciona el cociente de presiones $\Delta P/P_1$ y el nivel del ruido generado (SPL). Se encuentra primera una banda estrecha (L) sin casi emisión de sonido, sigue a continuación una banda más ancha (T) en la que aumenta moderadamente el nivel de ruido y a partir de un cierto punto Z_1 , el ruido aumenta bruscamente para alcanzar un valor máximo Z_2 .

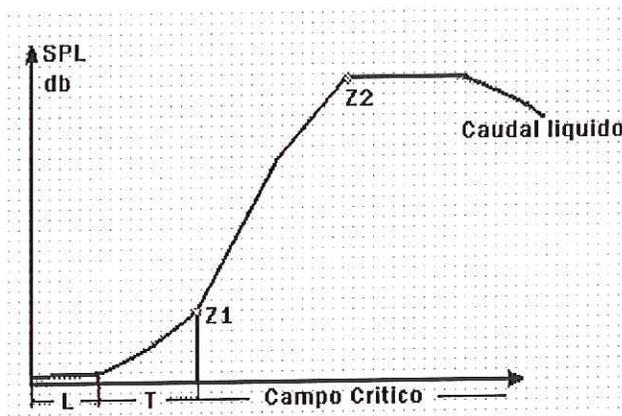


Figura 16. Nivel de ruidos en líquidos

- **El ruido aerodinámico:** Es la causa principal del ruido producido por la válvula. Proviene del flujo turbulento del vapor, del aire y de otros gases, siendo despreciable prácticamente en los líquidos. El ruido aerodinámico puede producirse por obstrucciones en el flujo del fluido, por expansión rápida o deceleración del gas a alta velocidad al salir de la válvula, o por codos o curvas bruscas existentes en el sistema de tuberías. Los factores a considerar en la generación de este tipo de ruido son el tipo de fluido, el caudal, la presión anterior a la válvula, la pérdida de carga, la configuración de la tubería, y las propiedades físicas del fluido. Entre los elementos que pueden producirlo directamente figuran los diafragmas, los autorreguladores de presión entre otros.

La reducción del ruido en las válvulas de control se logra bien atacando la fuente del ruido, o bien atenuando la transmisión del sonido. La atenuación de la transmisión del sonido se logra por disipación de la energía acústica

mediante materiales absorbentes. El material absorbente se sitúa aguas abajo y lo más próximo de la válvula de control.

Si el tipo de válvula seleccionada o el silenciador o ambos no atenúan suficientemente, es necesario aislar el ruido del exterior. Para ello se disponen aislamientos sobre las fuentes en forma de manguitos, cajas aislantes o bien incluso cámaras y edificios especiales.

3.6 SELECCIÓN DEL SISTEMA DE CONTROL

Las tres acciones combinadas del control PID, actúan sobre el elemento de control de la siguiente forma:

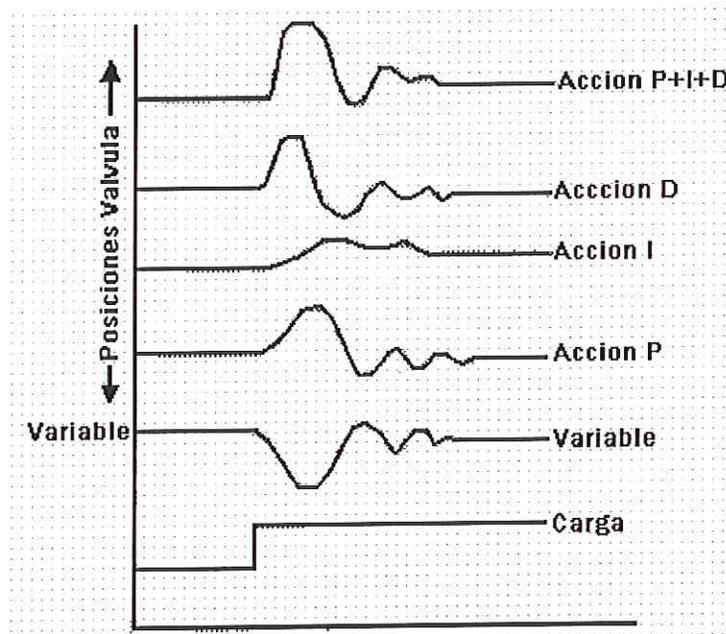


Figura 17. Acción del control PID

Sus características esenciales pueden resumirse así:

1. La acción proporcional cambia la posición de la válvula proporcionalmente a la desviación de la variable con respecto al punto de consigna.
2. La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la desviación con respecto al punto de consigna.
3. La acción derivada corrige la posición de la válvula proporcionalmente a la velocidad de cambio de la variable controlada.

Considerando esto, la selección del sistema de control es usualmente un compromiso entre la calidad del control que se desea y el coste del sistema de control. Es decir, debe ser suficiente para satisfacer la tolerancia requerida en el proceso, pero no debe incluir excesivos refinamientos que lo encarezcan. Sin embargo económicamente hay muy poca diferencia entre un controlador PI y uno PID, de modo que en el caso de estudiar proceso y sus perturbaciones que no sean bien conocidos puede ser más barato adquirir el controlador PID para tener así un potencial de mayor flexibilidad en el control del proceso.

3.7 PARAMETROS DE AJUSTE PARA LA ESTABILIDAD EN EL CONTROL

La estabilidad del control es la característica del sistema que hace que la variable vuelva al punto de consigna después de una perturbación. Los ajustes deseables para la estabilidad se representan a continuación:

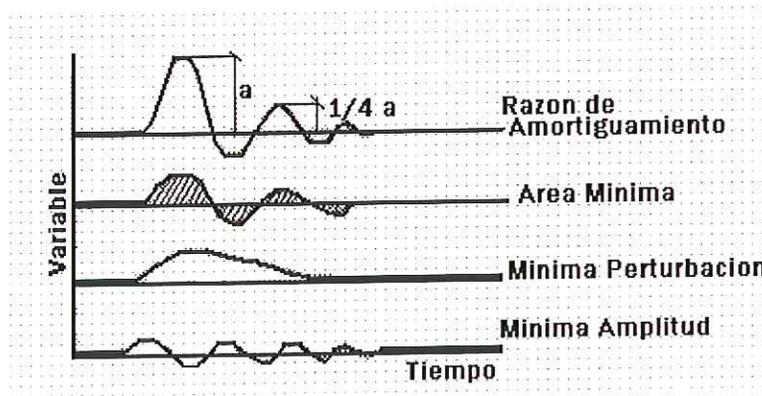


Figura 18. Parámetros de Ajuste para la estabilidad en el control

3.7.1 Razón de amortiguamiento

La amortiguación de la respuesta es tal que la relación de amplitudes entre las crestas de los dos primeros ciclos sucesivos es 0.25, es decir, que cada onda equivale a una cuarta parte de la anterior. Este criterio es un compromiso entre la estabilidad de respuesta del controlador y la rapidez del retorno de la variable a un valor estable.

Una relación mayor que 0.25 dará mayor estabilidad pero prolongará el tiempo de normalización, mientras que una relación menor de 0.25 devolverá la variable más rápidamente al punto de consigna o, pero perjudicará la estabilidad del sistema.

3.7.2 Área mínima

Este criterio indica que el área de la curva de recuperación debe ser mínima, para lograr que la desviación sea mínima en el tiempo más corto. Es decir, la expresión:

$$\int_0^t |e| dt$$

En la que $|e|$ es el valor absoluto de la desviación, debe tener el valor mínimo. Se denomina también criterio de la integral mínima del valor absoluto del error (IAE) y es un criterio intermedio entre:

- ISE (Criterio de mínima integral del cuadrado del error), donde debe ser la mínima expresión:

$$\int_0^t [e(t)]^2 dt$$

Esta penaliza los grandes errores, (pues el error está elevado al cuadrado), con lo cual las respuestas son poco amortiguadas.

- ITAE (Criterio de mínima integral en el tiempo del valor absoluto del error), donde debe ser la mínima expresión:

$$\int_0^t [e(t)]t^* dt$$

Esta penaliza los pequeños errores que se presentan al final de la curva de recuperación, con lo cual, las respuestas son altamente amortiguadas.

3.7.3 Mínima perturbación

Este requiere una curva de recobros no cíclicos, y se aplica cuando por ejemplo, las correcciones rápidas o cíclicas de una válvula de control de vapor, pueden perturbar seriamente las presiones de vapor de alimentación e influir en otros procesos alimentados por la misma fuente.

3.7.4 Amplitud mínima

De acuerdo con este criterio, la amplitud de la desviación debe ser mínima, lo cual se aplica especialmente a procesos en que el producto o el equipo puede

ser dañado por desviaciones momentáneas excesivas, y en este caso la magnitud de la desviación es más importante que su duración.

3.8 CRITERIOS DE ESTABILIDAD DE SISTEMAS

Los conceptos de equilibrio y perturbación son fundamentales para la estabilidad. En la mayoría de los movimientos (no controlados) de los componentes de ingeniería lejos del estado de equilibrio, la inestabilidad resulta en grandes tensiones que estos sistemas pueden no ser capaces de soportar.

Por ejemplo un edificio alto sometido a una perturbación sísmica cerca de su frecuencia resonante, un avión sometido a la alteración de una masa de aire inestable entre otros. En cada caso, el resultado es un mal rendimiento o, pero aun, la destrucción del sistema. Lo que queda claro es que la estabilidad del estado de equilibrio es un aspecto importante de la conducta del sistema dinámico. Los criterios de estabilidad mas utilizados son:

1. Estabilidad en el sentido de Lyapunov

En el sentido de Lyapunov, se dice que un estado de equilibrio es estable, si para cualquier ε escalar positiva existe una δ escalar positiva tal que $X(t_0) < \delta$ implique $X(t) < \varepsilon, t \geq t_0$. En otras palabras, cualquier trayectoria que se inicia en cualquier punto $X_0 = X(t_0)$ dentro de la región hiperesferica de radio δ permanece siempre en la región hiperesferica de radio ε .

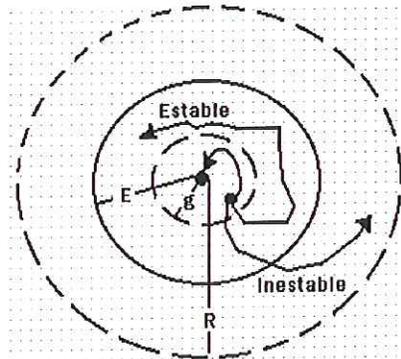


Figura 19. Estabilidad en el sentido de Lyapunov

2. Estabilidad por la técnica del lugar de las Raíces

Los valores propios de un sistema determinan su estabilidad y otro comportamiento. Se concluye que el medio mas directo para investigar la estabilidad de un sistema consiste en examinar los posibles valores de sus raíces características. Una forma de llevar a cabo es observar la ubicación de los valores propios en el plano complejo. Los valores propios en la mitad derecha del plano complejo, causan inestabilidad, mientras que las raíces

de la mitad izquierda del plano complejo son estables. La colocación de la raíz directamente sobre el eje imaginario causa estabilidad marginal o neutral, pero si la multiplicidad es mayor de 1 resulta inestabilidad.

Los valores propios de un sistema son funciones de los parámetros del mismo. En general, uno se interesa así por la ubicación de las raíces en el plano complejo, conforme varía algún parámetro del sistema. El resultado es un secuencia de posiciones de raíz a lo largo de las cuales los valores propios "se moverán" conforme cambie este parámetro. Esta secuencia de puntos se conoce como el lugar de las raíces. Una vez que se dispone del lugar de las raíces, se puede elegir los valores del parámetro que den la cualidad y estabilidad deseada para la conducta del sistema. Esta técnica es uno de los planteamientos fundamentales del diseño clásico del controlador por retroalimentación.

3. Estabilidad de Routh

Este criterio permite determinar la estabilidad asintótica de la ecuación característica de un sistema sin tener que encontrar primero los valores propios de este. La prueba, que consta de dos condiciones se aplica como sigue:

- a. Ponga la ecuación característica de interés en la forma polinomial.

$$a_0s^n + a_1s^{n-1} + \dots + a_{n-1}s + a_n = 0 \quad \text{donde } a_0 > 0$$

- b. La condición necesaria para la estabilidad es

$$a_i > 0; \quad i = 0, 1, 2, \dots, n$$

Esta es solo una condición necesaria. Si se viola, el sistema es inestable. Si se satisface, el sistema puede o no ser asintoticamente estable.

- c. La condición suficiente para la estabilidad asintótica (esto es para sistemas que satisfacen la condición necesaria) es que si todos los valores numéricos de la primera columna del arreglo siguiente:

$$\begin{array}{cccccccc} a_0 & a_2 & a_4 & a_6 & \dots & & & \\ a_1 & a_3 & a_5 & a_7 & \dots & & & \\ b_1 & b_2 & b_3 & \dots & & & & \\ c_1 & c_2 & c_3 & \dots & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \\ \cdot & \cdot & \cdot & & & & & \end{array}$$

Son positivos, esto es,

$a_0 > 0$; $a_1 > 1$; $b_1 > 0$; $c_1 > 0$; etc

El sistema es asintóticamente estable.

3.9 METODOS DE AJUSTE DE CONTROLADORES

Existen varios sistemas para ajustar los controladores al proceso, es decir, para que la banda proporcional (ganancia), el tiempo de acción integral (minutos/repeticón) y el tiempo de acción derivada (minutos de anticipo) del controlador, se acoplen adecuadamente con el resto de los elementos del bucle de control. Este acoplamiento debe ser tal que, ante una perturbación, se obtenga una curva de recuperación que satisfaga cualquiera de los criterios de ajuste mencionados para que el control sea estable, en particular, el área mínima con una relación de amortiguación de 0.25 entre crestas sucesivas de la onda.

Para que este acoplamiento entre el controlador y el proceso sea posible es necesario un conocimiento inicial de las características estáticas y dinámicas del sistema controlado. Existen dos métodos fundamentales para determinar estas características, el método analítico y el experimental.

3.9.1 El método analítico

Se basa en determinar el modelo o ecuación relativa a la dinámica del sistema, es decir, su evolución en función del tiempo. Este método es generalmente difícil de aplicar por la complejidad de los procesos industriales y se incorpora a los controladores digitales y al control distribuido, que disponen de la potencia de cálculo adecuada en la determinación de la identificación del proceso y de los parámetros del modelo.

3.9.2 El método experimental

Las características estáticas y dinámicas del proceso se obtienen a partir de una medida o de una serie de medidas realizadas en el proceso real, Estas respuestas del proceso pueden efectuarse de dos formas principales:

1. **Método de tanteo:** Este método requiere que el controlador y el proceso estén instalados completamente y trabajando en su forma normal. El procedimiento general se basa en poner en marcha el proceso con bandas anchas en todas las acciones, y estrecharlas después poco a poco individualmente, hasta obtener la estabilidad deseada. Para provocar cambios de carga en el proceso, y observar sus reacciones, se

mueve el punto de consigna arriba y abajo en ambas direcciones, lo suficiente para lograr una perturbación considerable, pero no demasiado grande que puede dañar el producto, perjudicar la marcha de la planta o bien crear perturbaciones intolerables en los procesos asociados.

Al ajustar los controladores PID, se procede del siguiente modo: Con la banda derivada e integral en cero, o al mínimo, se estrecha la banda proporcional hasta obtener una relación de amortiguamiento de 0.25. Se aumenta lentamente la banda integral en la forma indicada anteriormente hasta acercarse al punto de inestabilidad.

Se aumenta la banda derivativa en pequeños incrementos, creando al mismo tiempo desplazamientos del punto de consigna hasta obtener en el proceso un comportamiento cíclico, reduciendo ligeramente la última banda derivada. Después de estos ajustes, puede estrecharse normalmente la banda proporcional con mejores resultados de control.

2. Método de ganancia límite: Este método de lazo cerrado fue desarrollado por Ziegler y Nichols, en 1941 y permite calcular los tres términos de ajuste del controlador a partir de los datos obtenidos en una prueba rápida de características del bucle cerrado de control.

El método se basa en estrechar gradualmente la banda proporcional con los ajustes de integral y deriva en su valor más bajo, mientras se crean pequeños cambios en el punto de consigna, hasta que el proceso empieza a oscilar de modo continuo.

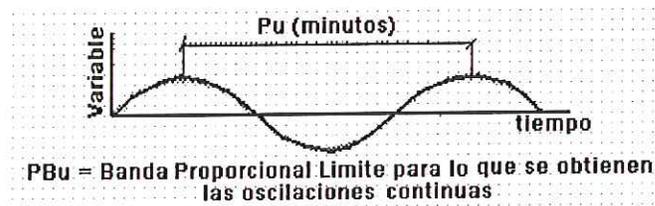


Figura 20. Oscilación mantenida

Esta banda proporcional se denomina Banda Proporcional Límite (PB_u). Se anota el período del ciclo de las oscilaciones P_u en minutos, y la última banda proporcional PB_u . Los ajustes de control que producirán aproximadamente una respuesta con una relación de amplitudes de 0.25, se calcula así:

Banda proporcional = $0.6 PB_u$.

Banda integral = $P_u/2$.

Banda derivada = $P_u/8$.

3.10 CONTROLADORES

El controlador es el dispositivo responsable de elaborar la señal correctora que constantemente es enviada al elemento final de regulación del proceso, con el fin último de alcanzar, restablecer o mantener las condiciones de regulación deseadas; es decir, hacer que la medida se mantenga en un valor lo más próximo posible al punto de consigna. Esta señal correctora, o salida del controlador, es función de la señal de error, llamada también desviación (la diferencia entre la consigna y la medida), y tiene o puede tener en cuenta su signo, magnitud, duración y tendencia.

Los diversos modos de actuación que determinan la salida del controlador se llaman modos de regulación y son debidos, a su vez, a la incorporación combinada de diferentes acciones de control.

3.10.1 Controlador proporcional (P)

La respuesta proporcional es la base de los tres modos de control, si los otros dos, acción integral (reset) y acción derivativa están presentes, éstos son sumados a la respuesta proporcional. "Proporcional" significa que el cambio presente en la salida del controlador es algún múltiplo del porcentaje de cambio en la medición.

La regulación proporcional es aquella en que el elemento final de regulación efectúa, con referencia a una posición inicial correspondiente a una señal de error nula, un movimiento a la magnitud de la desviación. El factor de proporcionalidad es ajustable.

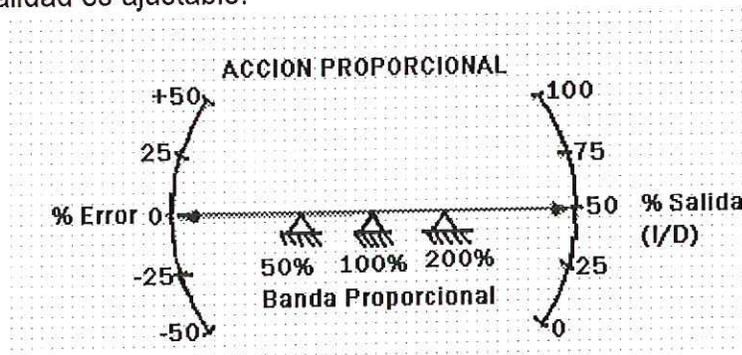


Figura 21. Acción del controlador proporcional

La figura ilustra la respuesta de un controlador proporcional por medio de un indicador de entrada / salida pivotando en una de estas posiciones. Con el pivote en el centro entre la entrada y la salida dentro del gráfico, un cambio del 100% en la medición es requerido para obtener un 100% de cambio en la salida, o un desplazamiento completo de la válvula. Un controlador ajustado para responder de ésta manera se dice que tiene una banda proporcional del

100%. Cuando el pívot se encuentra hacia la mano derecha, la medición de la entrada debería tener un cambio del 200% para poder obtener un cambio de salida completo desde el 0% al 100%, esto es una banda proporcional del 200%. Finalmente, si el pívot estuviera en la posición de la mano izquierda y si la medición se moviera sólo cerca del 50% de la escala, la salida cambiaría 100% en la escala. Esto es un valor de banda proporcional del 50%.

Por lo tanto, cuanto mas chica sea la banda proporcional, menor será la cantidad que la medición debe cambiar para el mismo tamaño de cambio en la medición. En otras palabras, menor banda proporcional implica mayor cambio de salida para el mismo tamaño de medición. Esta misma relación está representada por la siguiente figura.

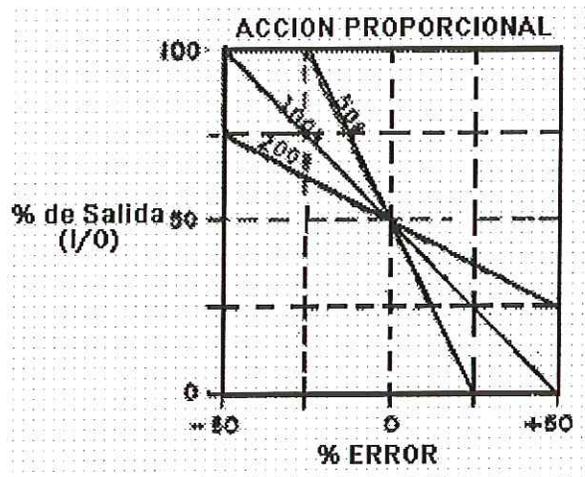


Figura 22. Relación % de salida vs % de error en un controlador proporcional

Para cualquier lazo de control de proceso sólo un valor de la banda proporcional es el mejor. A medida que la banda proporcional es reducida, la respuesta del controlador a cualquier cambio en la medición se hace mayor y mayor. En algún punto dependiendo de la característica de cada proceso particular, la respuesta en el controlador será lo suficientemente grande como para controlar que la variable medida retorne nuevamente en dirección opuesta a tal punto de causar un ciclo constante de la medición.

Este valor de banda proporcional, conocido como la última banda proporcional, es un límite en el ajuste del controlador para dicho lazo. Por otro lado, si se usa una banda proporcional muy ancha, la respuesta del controlador a cualquier cambio en la medición será muy pequeña y la medición no será controlada en la forma suficientemente ajustada. La determinación del valor correcto de banda proporcional para cualquier aplicación es parte del procedimiento de ajuste (tuning procedure) para dicho lazo. El ajuste correcto de la banda proporcional puede ser observado en la respuesta de la medición a una alteración.

Una consecuencia de la aplicación del control proporcional al lazo básico de control es el offset. Offset significa que el controlador mantendrá la medida a un valor diferente del valor de consigna. Esta diferencia, que será mantenida por el lazo de control, es característica de la aplicación del control proporcional único en los lazos de realimentación.

La aceptabilidad de los controles sólo proporcionales dependen de si este valor de offset será o no tolerado, ya que el error necesario para producir cualquier salida disminuye con la banda proporcional, cuanto menor sea la banda proporcional, menor será el offset. Para grandes capacidades, aplicaciones de tiempo muerto pequeñas que acepten una banda proporcional muy estrecha, el control sólo proporcional será probablemente satisfactorio dado que la medición se mantendrá a una banda de un pequeño porcentaje alrededor del valor de consigna.

Si es esencial que no haya una diferencia de estado estable entre la medición y el valor de consigna bajo todas las condiciones de carga, una función adicional deberá ser agregada al controlador.

3.10.2 Controlador PID

La acción proporcional corrige la posición de la válvula en una cuantía proporcional a la desviación. Es de efecto instantáneo y enérgico, pero suele presentar desviación permanente.

La acción integral mueve la válvula a una velocidad proporcional a la señal de error o desviación. Es de efecto lento y progresivo, pero sigue actuando hasta anular la desviación permanente.

La acción derivativa corrige la posición de la válvula en una cantidad proporcional a la velocidad del cambio de la desviación. Ello produce un efecto anticipativo al tener en cuenta la tendencia de la variable controlada.

La ecuación que rige el comportamiento del controlador PID se expresa así:

$$Y = Y_0 + G \left(e + \frac{1}{T_i} \int_0^t e \, dt + T_d \frac{de}{dt} \right)$$

Donde: Y = Salida del controlador, e = c – m = Error o desviación, c = valor de consigna, m = valor medido, G = Ganancia (Constante Proporcional), T_i = Tiempo integral, T_d = Tiempo derivativo, Y₀ = Salida inicial del controlador.

3.11 CONTROL DIFUSO

3.11.1 Historia del control difuso

Las bases teóricas de la lógica difusa fueron enunciadas en 1965 por Lotfi A. Zadeh [Zadeh 65], profesor de ingeniería Eléctrica en la Universidad de California en Berkeley, pero Zadeh no presenta la teoría básica de los controladores borrosos hasta 1973 [Zadeh 73, 88]. Aunque al principio su trabajo fue recibido fríamente, a partir de él otros investigadores comenzaron a aplicar la lógica borrosa a diversos procesos. Así, desde Mamdani [Mamdani 74, 83], quien aplica la lógica difusa a un sistema de control de vapor, se han venido sucediendo numerosas aplicaciones. Otra de las más clásicas quizás sea la de Smith y otros, que en 1980 aplican esta técnica al control de hornos rotativos en una cementera [García Cerezo 91].

Sin duda alguna, donde más han tenido éxito los sistemas difusos ha sido en Japón [Tsukamoto 79]. En los Estados Unidos y Europa, solamente se empezó a dar importancia a la lógica difusa cuando desde Japón empezó a llegar información sobre numerosas aplicaciones prácticas. A partir de entonces empresas norteamericanas como NASA, Boeing, Ford, Rockwell o Bell comenzaron a aplicar la lógica difusa; por ejemplo Ford Motor Co, experimenta con un sistema de aparcamiento automático para camiones con remolque.

3.11.2 Introducción al control difuso

Los sistemas basados en lógica borrosa, emulan la manera en que el cerebro razona o piensa, además permite tratar información imprecisa, como estatura media, temperatura baja o mucha fuerza, en términos de conjuntos difusos (imprecisos, en definitiva), los cuales se combinan en reglas para definir acciones.

Los sistemas borrosos permiten modelar cualquier proceso no lineal, de la misma manera, permiten utilizar fácilmente el conocimiento de los expertos en un tema, bien directamente, bien como punto de partida para una optimización automática, al formalizar el conocimiento a veces ambiguo de un experto (o sentido común) de una forma realizable.

La teoría de conjuntos borrosos parte de la teoría clásica de conjuntos, añadiendo una función de pertenencia al conjunto, definida ésta como un número real entre 0 y 1. Para cada conjunto o subconjunto borroso se define una función de pertenencia o inclusión $\mu_A(t)$, que indica el grado en que la variable t está incluida en el concepto representado por la etiqueta A .

Dentro de los sistemas borrosos se incluyen diversas teorías, como la teoría de conjuntos borrosos [Combettes 93], extensión de la teoría de conjuntos clásica,

o la lógica borrosa, [Lukasiewicz /30], o la lógica trivaluada (verdadero, falso e indeterminado) [Kosko 93]. No obstante, quizás la principal aplicación actual de la lógica borrosa sean los sistemas de control basados en esta, o sistemas de control difuso, que utilizan las expresiones de esta lógica para formular reglas orientadas al control de sistemas [Brubaker 92, Nass 92, Passino 98].

Dichos sistemas pueden considerarse una extensión de los sistemas expertos, pero superando los problemas prácticos que éstos presentan en el razonamiento en tiempo real, causados por la explosión exponencial de las necesidades de cálculo requeridas para el análisis lógico completo de las amplias bases de reglas que manejan.

Este control de sistemas puede ser realizado a diferentes niveles, en el nivel inferior un controlador borroso puede realizar el control en bucle cerrado de una determinada magnitud física del sistema, con el fin de mantenerla en torno a un valor de referencia.

Por otro lado aplicado a los niveles superiores de planificación, un controlador puede aconsejar los grados de almacenamiento necesarios para mantener la producción prevista, con los mínimos costos y teniendo en cuenta los datos históricos.

Estos métodos de control pueden también aplicarse en brazos articulados y vehículos autónomos, en los cuales los modelos matemáticos significativos son muy complejos. Para desarrollar estos sistemas de control se precisa de herramientas de diseño de controladores que faciliten la adquisición de conocimiento y el análisis del controlador resultante, incluyendo las propiedades dinámicas de estabilidad y robustez.

3.11.3 Conjuntos difusos

En los conjuntos clásicos algo está incluido completamente en él o no lo está, en absoluto; esta situación puede describirse asignando un 1 a todos los elementos incluidos en el conjunto y un 0 a los no incluidos. A la función que asigna estos valores la denominaremos Función de pertenencia o inclusión (membership function). Los conjuntos borrosos permiten describir el grado de pertenencia de un objeto (o el valor de una variable) al concepto dado por la etiqueta que le da nombre, asignando un número real entre 0 y 1 (valores intermedios).

Dado un cierto conjunto borroso F , se definen los siguientes términos. El conjunto soportado es el conjunto (clásico) de todos los valores de U para los que $\mu_F(u) > 0$. Los puntos de cruce son aquellos valores para los que $\mu_F(u) = 0.5$. Se dice que un conjunto borroso es de tipo singleton si su conjunto soportado es de un solo valor.

Funciones de inclusión o de pertenencia de conjuntos difusos: La función de inclusión o función de pertenencia, de un conjunto difuso consiste en un conjunto de pares ordenados $F = \{ (u, \mu_F(u)) / u \in U \}$ si la variable es discreta, o una función continua si no lo es. El valor de $\mu_F(u)$, indica el grado en que el valor u de la variable U está incluida en el concepto representado por la etiqueta F .

Para la definición de estas funciones de pertenencia se utilizan convencionalmente ciertas familias de formas estándar, por coincidir con el significado lingüístico de las etiquetas más utilizadas. Las más frecuentes son:

- La función de tipo trapezoidal: Se define por cuatro puntos a, b, c, d . Esta función es cero para valores menores de a y mayores de d , vale uno entre b y c , y toma valores entre 0 y 1 entre a y b , y entre c y d . Se utiliza habitualmente en sistemas sencillos, pues permite definir un conjunto con pocos datos, y calcular su valor de pertenencia con pocos cálculos.

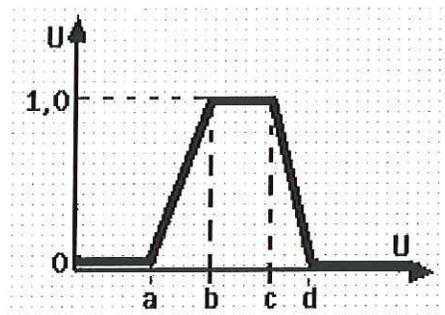


Figura 23. Función trapezoidal

Esta función resulta adecuada para modelar propiedades que comprenden un rango de valores (adulto, normal, adecuado...). Para modelar una función triangular se hace $b=c$, para una función tipo S, (pero no suave), se hace $c=d=\max(u)$, y para una función de tipo singleton $a=b=c=d$.

- La función de tipo Singleton: tiene valor 1 sólo para un punto a y 0 para el resto. Se utiliza habitualmente en sistemas simples para definir los conjuntos de las particiones de las variables de salida, pues permite simplificar los cálculos y requiere menos memoria para almacenar la base de reglas.

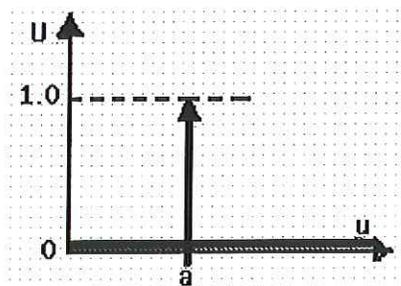


Figura 24. Función singleton

- La función tipo T (triangular): Esta función es adecuada para modelar propiedades con un valor de inclusión distinto de cero pares a un rango de valores estrecho en torno a un punto b.

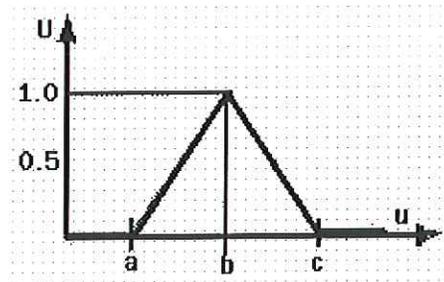


Figura 25. Función triangular

- La función de tipo s: La función resulta adecuada para modelar propiedades como: grande, mucho, positivo. Se caracteriza por tener un valor de inclusión distinto de cero para un rango de valores por encima de cierto punto a, siendo 0 por debajo de a y 1 para valores mayores de c. Su punto de cruce (valor 0.5) es $b=(a+c)/2$; y entre los punto a y c es de tipo cuadrático (suave).

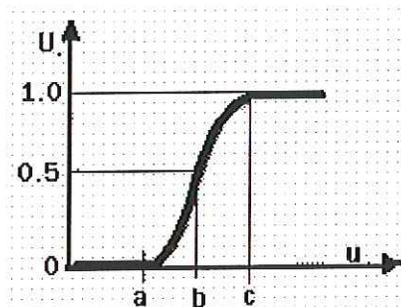


Figura 26. Función tipo s

La función de tipo π : Esta función tiene forma de campana, y resulta adecuada para los conjuntos definidos en tono a un valor c; como médium, normal, cero... Puede definirse también utilizando expresiones analíticas exponenciales o cuadráticas, como la bien conocida campana de Gauss.

$$\pi(u; b, c) = \left\{ \begin{array}{l} S(u; c-b, c-b/2, c) \Rightarrow u \leq c \\ 1 - S(u; c-b, c-b/2, c) \Rightarrow u \geq c \end{array} \right\}$$

3.11.4 Variable lingüística

Se denomina variable lingüística a aquella que puede tomar por valor términos del lenguaje natural, como mucho, poco, positivo, negativo entre otras, que son las palabras que desempeñan el papel de etiquetas en un conjunto difuso; no

obstante a una variable lingüística podrán asignarse también valores numéricos. Así, en una expresión como la temperatura es fría, la variable temperatura deber ser entendida como una variable lingüística, pues se le asigna como valor el conjunto difuso fría, pero además esta variable puede también tomar valores numéricos como la temperatura es 4°C.

Una variable lingüística se define por una tupla $(A, T(A), U, G, M)$, donde A es el nombre de la variable, $T(A)$ es el conjunto de términos que nombran los valores x que puede tomar A , valores que son conjuntos difusos en U ; el conjunto de valores numéricos que puede tomar para una variable discreta, o el rango de valores posibles x , y se nombra como U ; por último, G es una regla sintáctica para la generación de los nombres de los valores x , y M es una regla semántica para asociar un significado a cada valor.

3.11.5 Particiones difusas

Se conoce por partición a un conjunto de los conjuntos difusos que se han definido para la variable A . Una partición de A es uno de los subconjuntos que pueden formarse con los elementos (términos) de $T(A)$. Se dice que una partición es completa, si para todos los valores posibles de U existe en la partición un conjunto con pertenencia no nula (es decir, los conjuntos definidos cubren todo U); así, completitud es el porcentaje de los elementos de U para los que existe en la partición un conjunto con pertenencia no nula frente al total de elementos de U . Se dice que dos conjuntos difusos están solapados si su intersección es no nula; de este modo, el solapamiento de un conjunto difuso es la relación del número de elementos que comparte con otros conjuntos de la misma partición, respecto del número total de elementos que lo forman.

Para la realización de controladores basados en lógica difusa se han de definir particiones de las variables del controlador. Normalmente se recomienda que estas particiones sean completas, con un solapamiento del 20% al 50%, y en número impar. Normalmente se recomiendan particiones de 3 a 7 conjuntos, pues la complejidad no es excesiva y permiten una precisión suficiente en la descripción de los valores de la variable. Además, se recomienda definir conjuntos de tipo T en torno a puntos singulares como el cero.

3.11.6 Operaciones difusas

A los conjuntos difusos se les puede aplicar determinados operadores, o bien pueden realizarse operaciones entre ellos. Al aplicar un operador sobre un solo conjunto difuso se obtiene otro conjunto difuso; de igual forma al combinar dos o más subconjuntos mediante alguna operación, se obtendrá otro conjunto.

Se pueden definir tres operaciones básicas; complemento, unión e intersección, de la siguiente manera: Sean los conjuntos borrosos A y B .

- Complemento $\mu_{\bar{A}}(x) = 1 - \mu_A(x)$
- Unión $\mu_{A \cup B}(x) = \max[\mu_A(x), \mu_B(x)]$
- Intersección $\mu_{A \cap B}(x) = \min[\mu_A(x), \mu_B(x)]$

El funcionamiento de estas operaciones básicas coincide con el de las correspondientes a las de la teoría clásica de conjuntos, es decir la teoría clásica de conjuntos puede considerarse un caso particular de la difusa.

Se pueden definir otras operaciones como:

- Igualdad $\mu_A(x) = \mu_B(x)$
- Norma $\mu_{NORMA(A)}(x) = \frac{\mu_A(x)}{\max[\mu_A(x)]}$
- Concentración $\mu_{Conc(A)}(x) = (\mu_A(x))^2$
- Dilatación $\mu_{Dilat(A)}(x) = (\mu_A(x))^{0.5}$

Las funciones correspondientes a la definición de la unión y la intersección pueden generalizarse, a condición de cumplir ciertas restricciones.

Las funciones que cumplen estas condiciones se conocen respectivamente como Conorma Triangulare (T-Conorma) y Norma triangular (T-Norma); algunas de las más usadas son:

Conormas	Normas
- MAX (a,b)	MIN (a,b)
- (a + b - ab)	(ab)
- a + b = MIN (1, a + b)	a * b = MAX (0, a + b - 1)

Las conormas y normas cumplen las leyes de Morgan que la relacionan al igual que en la lógica clásica.

Por otro lado la dilatación y la Concentración, se conocen como modificadores, ya que permiten formalizar el tipo de modificadores aplicados sobre un mismo término en el lenguaje común, como por ejemplo *muy* o *más* o *menos*.

Por ejemplo para el conjunto borroso F en U, F=frio, el conjunto muy frío puede definirse de la siguiente forma:

$$\mu_{MUYF}(u) = (\mu_F(u))^2$$

Ya que al calcular el cuadrado de un número entre 0 y 1 se obtiene un valor más pequeño, con lo que esta operación causa una concentración de la función de pertenencia original, es decir la hace mas estrecha, lo que implica disponer de una función más exigente para decidir que un valor es frío, representando así el termino muy frío.

Por otra parte, el conjunto más o menos frío puede definirse como:

$$\mu_{mas\ o\ menos\ F}(u) = (\mu_F(u))^{0.5}$$

Pues al calcular la raíz cuadrada de un número entre 0 y 1 se obtiene un valor más grande, es decir, esta operación causa una dilatación sobre la función de pertenencia de partida, siendo de esta manera menos exigente para decidir si un valor corresponde a frío por lo que se tendría el término más o menos frío.

3.11.7 Inferencia difusa

La lógica difusa se ocupa del razonamiento formas con proposiciones, pero a diferencia de la lógica normal, los valores de las preposiciones pueden tomar valores intermedios entre verdadero y falso.

Los conjuntos borrosos también representan predicados en la lógica proposicional. El objeto de la lógica difusa es proporcionar un soporte formal al razonamiento basado en el lenguaje natural, que se caracteriza por tratarse de un razonamiento de tipo aproximado, que hace uso de unas proposiciones que a su vez expresan información de carácter impreciso.

- Principio de extensión: Permite convertir conceptos no difusos en difusos, siendo además la base de la inferencia en los sistemas difusos.

Sean U y V dos universos de discurso, y f una función de U y V. En general, para un conjunto difuso A en U el principio de extensión define un conjunto difuso B en V dado por:

$$\mu_B(v) = \sup_{u \in f^{-1}(v)} [\mu_A(u)]$$

Es decir $\mu_B(v)$ es el máximo de $\mu_A(u)$ para todos los $u \in U$ que cumplen que $f(u)=v$, donde $v \in V$ y suponemos que $f^{-1}(v)$ no es vacío. Si $f^{-1}(v)$ es vacío para algún $v \in V$, definiremos $\mu_B(v)=0$.

- Relación borrosa: Para dos universos de discurso U y V, una relación borrosa se define como un conjunto R en el espacio $U \times V$, cuya función de inclusión se denota como $\mu_R(u,v)$, con $u \in U$ y $v \in V$.

Puede definirse también la composición Sup-Star $R \circ S$ para dos relaciones difusas R y S en $U \times V$ y $V \times W$, respectivamente, como otra relación difusa la siguiente función de inclusión:

$$\mu_{R \circ S}(u, v) = \sup_{v \in V} [\mu_R(u, v) * \mu_S(v, w)]$$

Donde $u \in U, v \in V, w \in W$, y el operador $*$ puede ser cualquier t-norma definida anteriormente. En resumen la composición sup-star de dos relaciones borrosas $R \circ S$ es un conjunto borroso $U \times W$. Dependiendo de la elección particular para el operador $*$, se pueden tener distintos casos particulares de relaciones difusas, siendo otra de las más habituales la sup-min (operador MIN) y la sup-producto (operador producto).

- Implicación borrosa: Si se definen dos conjuntos difusos A y B en U y V , respectivamente. Una implicación borrosa de A en B , que se indica con $A \rightarrow B$, es una relación difusa en $U \times V$, que puede venir definida por alguna de las siguientes funciones de inclusión empleadas en la literatura de lógica difusa:

- Conjunción borrosa $\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) * \mu_B(v)$
- Disyunción borrosa $\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_A(u) \dot{+} \mu_B(v)$
- Implicación material $\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_{\bar{A}}(u) \dot{+} \mu_B(v)$
- Cálculo proposicional $\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \mu_{\bar{A}}(u) \dot{+} \mu_{A * B}(v)$
- Modus Ponens Generalizado $\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \sup \{c \in [0,1] \mid \mu_A(u) * c \leq \mu_B(v)\}$
- Modus Tolens Generalizado $\mu_{A \rightarrow B}(u, v) = \inf \left\{ c \in [0,1] \mid \mu_B(v) \dot{+} c \leq \mu_A(u) \right\}$

3.11.8 Reglas difusas

Las reglas difusas combinan uno o más conjuntos borrosos de entrada, llamados antecedentes o premisas, y les asocian un conjunto borrosos de salida, llamado consecuente o consecuencia. Los conjuntos difusos de la premisa de asocian mediante conjuntivas lógicas como y (and), o (or), etc.

Las reglas difusas permiten expresar el conocimiento que se dispone sobre la relación entre antecedentes y consecuentes. Para expresar este conocimiento

de forma completa normalmente se precisa de varias reglas, que se agrupan formando lo que se conoce como una base de reglas, es decir, el conjunto de reglas que expresan las relaciones conocidas entre antecedentes y consecuentes.

La base de reglas se puede representar bien como una tabla de las reglas que la forman, o bien como una memoria asociativa borrosa o FAM (Fuzzy Associative Memory).

Las FAM son matrices que representan la consecuencia de cada regla definida para cada combinación de dos entradas; las FAM permiten realizar una representación gráfica clara de las relaciones entre dos variables lingüísticas de entrada y la variable lingüística de salida, pero requiere que se indique explícitamente todas las reglas que se pueden formar con estas dos variables de entrada. Es posible también definir FAM de más de dos dimensiones, pero su tamaño se hace rápidamente excesivo y son más difíciles aún de manejar.

En su lugar se suele trabajar con varias FAM de dimensiones dos, para así definir subconjuntos de reglas que asocien las entradas de dos en dos en la base de reglas general.

Formalmente, una base de reglas difusas es una colección de reglas $R^{(l)}$ con el formato

$$R^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and ... and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y \text{ is } G^l$$

Donde F_i^l y G^l son conjuntos difusos en $U_i \subset \mathfrak{R}$ y $V \subset \mathfrak{R}$, respectivamente. y X y Y , son variables lingüísticas. Este formato de reglas se conoce como borroso puro o de tipo Mandami, por ser quien primero las propuso en 1974.

Otro formato frecuente para las reglas es el llamado de tipo Sugeno; en este caso, la función de salida es una combinación lineal de las variables de entrada, o en un caso más general, una función genérica de las variables de entrada.

Y se representa de la siguiente forma:

$$R^{(l)} : \text{IF } x_1 \text{ is } F_1^l \text{ and ... and } x_n \text{ is } F_n^l \text{ THEN } y^l = f^l(x)$$

Si llamamos M al número de reglas IF-THEN de la base de reglas entonces $l = 1, 2, 3, \dots, M$ en las ecuaciones anteriores. El vector x representa el conjunto de las entradas, mientras que y es la salida del sistema difuso.

Los sistemas difusos descritos con n entradas x_i y una sola salida y , se conocen como MISO (Multiple input Single Output), mientras que los que tiene varias salidas (de 1 hasta k) se conocen como MIMO (Multiple Input Multiple Output).

3.11.9 Dispositivos de inferencia borrosa

Se llaman dispositivos de inferencia borrosa a los sistemas que interpretan las reglas de tipo IF-THEN de una base de reglas, con el fin de obtener los valores de salida a partir de los actuales valores de las variables lingüísticas de entrada al sistema.

Existen diferentes tipos de implicaciones:

- Implicación borrosa por la regla del mínimo:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

- Implicación borrosa por la regla del producto:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \mu_A(x)\mu_B(y)$$

- Implicación borrosa por la regla aritmética:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min[1, 1 - \mu_A(x) + \mu_B(y)]$$

- Implicación borrosa por la regla max-min:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max\{\min[\mu_A(x), \mu_B(y)], 1 - \mu_A(x)\}$$

- Implicación borrosa por la regla Booleana:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \max[1 - \mu_A(x), \mu_B(y)]$$

- Implicación borrosa por la regla de Boguen:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \begin{cases} 1 & \mu_A(x) \leq \mu_B(y) \\ \mu_B(y) / \mu_A(x) & \mu_A(x) > \mu_B(y) \end{cases}$$

Para simplificación de las ecuaciones anteriores, llamamos a $F_1^l x, \dots, x F_n^l = A$ y

$$G^l = B.$$

Para concluir, la salida de un dispositivo de inferencia borrosa puede consistir en:

- M conjuntos difusos B^l , con $l=1,2,\dots,M$, cada una de los cuales es el resultado de aplicar la entrada A' a cada una de las M reglas de la base de reglas.
- Un único conjunto borroso B' , que es la unión de los M conjuntos difusos B^l calculado según

$$\mu_{B'}(y) = \mu_{B^1}(y) \dot{+} \dots \dot{+} \mu_{B^m}(y)$$

- M escalares y^l , con $l=1,2,\dots,M$, si las reglas son del tipo Sugeno; cada uno de los cuales es el resultado de aplicar la entrada A' a cada una de las M reglas de la base de reglas.

3.11.10 Borrosificador (fuzzificador)

Establece una relación entre puntos de entrada no difusos al sistema $x = (x_1, \dots, x_n)^T$, y sus correspondientes conjuntos difusos A en U (las variables procedentes del exterior serán, en general, valores no difusos, y habrá que fuzzificarlas o Borrosificarlas previamente).

Se pueden utilizar diversas estrategias de fuzzificación:

- Borrosificador singleton:** Es el método de fuzzificación más utilizado, principalmente en sistemas de control, y consiste en considerar los propios valores discretos como conjuntos difusos. De otra forma, para cada valor de entrada x se define un conjunto A' que los soporta, con función de pertenencia $\mu_{A'}(x')$, de modo que $\mu_{A'}(x) = 1$, ($x' = x$), y $\mu_{A'}(x') = 0$, para todos los otros $x' \in U$ en los que x' es diferente de x .
- Borrosificador no singleton:** En este método de fuzzificación se utiliza una función exponencial del tipo siguiente:

$$\mu_{A'}(x') = a \cdot \exp \left[- \left(\frac{x' - x}{\sigma} \right)^2 \right]$$

Función con forma de campana, centrada en el valor de x de entrada, de anchura σ y amplitud a .

3.11.11 Desborrosificador (defuzzificador)

La defuzzificación es la función que transforma un conjunto borroso en V, normalmente salida de un dispositivo de inferencia difusa, en un valor no difuso $y \in V$. Para esta tarea se utilizan diversos métodos entre los que están:

- a. Defuzzificación por máximo:

$$y = \arg \sup_{y \in V} (\mu_{B^l}(y))$$

Es decir, y es el punto de V en que $\mu_{G^l}(y)$ alcanza su valor máximo, donde $\mu_{B^l}(y)$ es el único conjunto difuso resultante de un dispositivo de inferencia difusa.

- b. Defuzzificación por media de centros:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-l} (\mu_{B^l}(y^{-l}))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B^l}(y^{-l}))}$$

Donde y^{-l} representa el centro del conjunto difuso G^l (definido como el punto V en el que $\mu_{G^l}(y)$ alcanza su valor máximo), y $\mu_{B^l}(y)$ esta definido como los grados de pertenecía resultantes de la inferencia difusa.

- c. Defuzzificación por centro de área:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M M^l (\mu_{B^l}(y^{-l}))}{\sum_{l=1}^M A^l (\mu_{B^l}(y^{-l}))} = \frac{\sum_{l=1}^M \int_V \mu_{B^l}(y^{-l})^2 dy M^l \mu_{B^l}(y^{-l})}{\sum_{l=1}^M \int_V \mu_{B^l}(y^{-l}) dy}$$

Donde M^l es el momento (en torno al eje y del universo de discurso de la salida V) de la función de inclusión del conjunto difuso G^l , A^l es el área, y $\mu_{B^l}(y)$ esta definido como los grados de pertenecía resultantes de la inferencia difusa.

- d. Métodos basados en el centro de gravedad:

- Centro de gravedad ponderado por el área:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i * w_i}{\sum_{i=1}^n s_i}$$

Donde: w es el centro de gravedad del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y s es el área del mismo conjunto

- Centro de gravedad ponderado por la altura:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i * w_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Donde: w es el centro de gravedad del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y h es altura del mismo conjunto

- e. Métodos basados en el punto máximo de criterio:

- Punto máximo de criterio (PMC) ponderado por el área:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i * G_i}{\sum_{i=1}^n s_i}$$

Donde: G es el punto de máximo de criterio del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y s es el área del mismo conjunto

- Punto máximo de criterio (PMC) ponderado por la altura:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i * G_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Donde: G es el punto de máximo de criterio del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y h es altura del mismo conjunto

Estos métodos de defuzzificación son los empleados para obtener el valor de salida no difusa de un dispositivo de inferencia difusa que utiliza reglas de tipo Mandami. Si las reglas utilizadas son del tipo Sugeno, el valor de salida no

difusa se obtiene como media ponderada de las salidas de cada regla de la base de reglas según:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-l} (\mu_{A^l}(x))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{A^l}(x))}$$

Donde y^l es la salida de la regla l , y el término $\mu_{A^l}(y)$ resulta de la inferencia difusa. Este valor y^l de la salida de una regla del tipo Sugeno, se calcula frecuentemente como una combinación lineal de las entradas

$$y^l = f_l(x) = a_{l,0} + \sum_{i=1}^n a_{l,i} x_i$$

3.11.12 Desarrollo de sistemas difusos

La selección de los detalles concretos de implementación del sistema difuso dependerá de diversos condicionantes; hablando en términos generales, los principales son:

- **Eficiencia computacional:** Para problemas complejos, con muchas variables lingüísticas o muchas reglas, o en realizaciones en microcontroladores de poca capacidad de cálculo y poca memoria, resulta fundamental seleccionar métodos que no requieran muchos cálculos o mucha memoria. Así, son preferibles en este caso funciones de inclusión triangulares o trapezoidales frente a las exponenciales, y el cálculo de máximos frente a multiplicaciones. Además, las funciones de inclusión de tipo singleton para la salida producen sistemas más simples, aunque son más sensibles al ruido de las entradas.

- **Facilidad de adaptación:** En aplicaciones en las que se requieren que el sistema pueda realizar aprendizaje puede ser necesario que la función de salida $y=f(x)$ sea derivable respecto de los parámetros que se han de ajustar. En este caso, por el contrario, son preferibles funciones de inclusiones exponenciales frente a las triangulares o trapezoidales, y las multiplicaciones frente al cálculo de máximos.

3.11.13 Controladores difusos

Los sistemas expertos de control difuso basados en reglas, conocido como controladores difusos o FLC (Fuzzy Logic Controllers), o también, sistemas de inferencia difusa o FIS (Fuzzy Inference Systems), son sin duda la aplicación más extendida de la lógica difusa.

La siguiente grafica es un esquema típico de un controlador basado en un sistema difuso, un primer bloque realiza un preprocesado de las variables de

entrada, que proporciona el vector de entradas al controlador difuso o FLC. El controlador difuso aplica la entrada que recibe a la base de reglas, para obtener la salida. Finalmente, esta salida puede requerir un procesado final (posprocesado), con el fin de adecuarla al proceso que se ha de controlar. Cabe resaltar que el tipo de preprocesado y posprocesado determina la clase de controlador, e influye de forma considerable en sus propiedades.

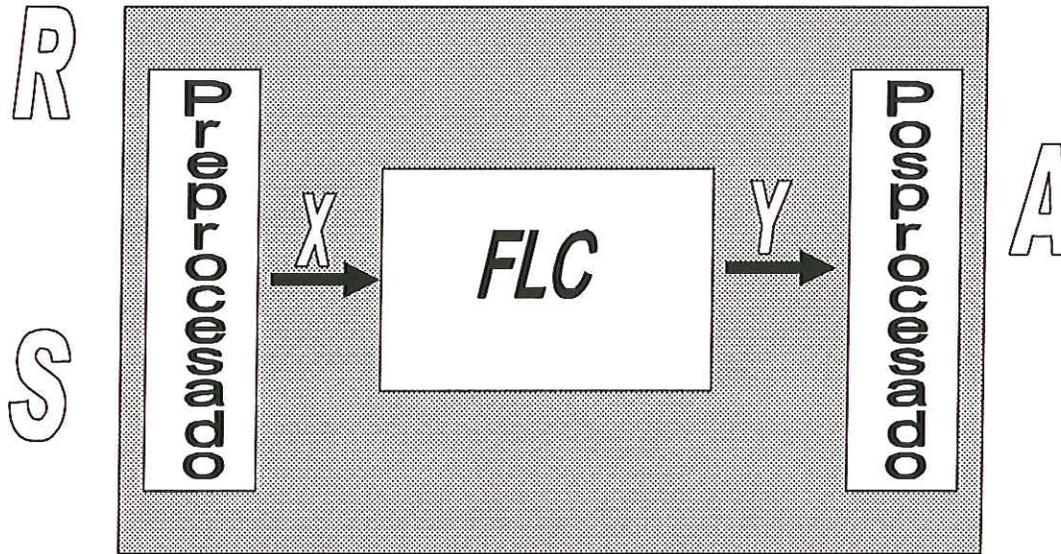


Figura 27. Esquema de un controlador difuso

La estructura interna de un controlador difuso o FLC se muestra a continuación;

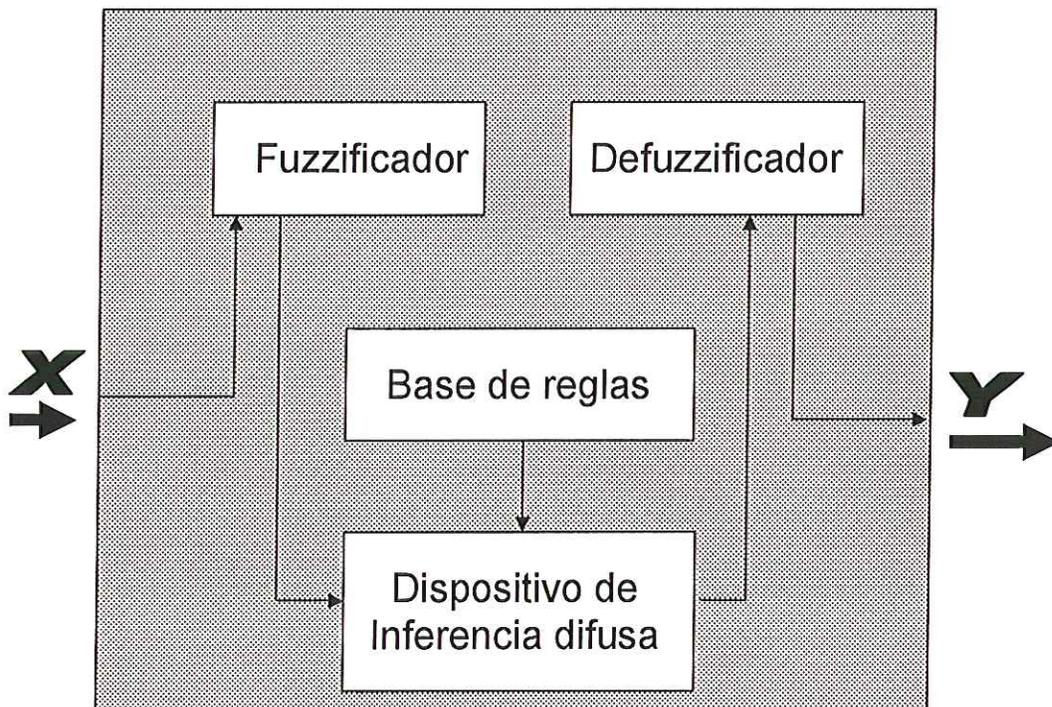


Figura 28. Estructura interna de un controlador difuso FLC

Un primer elemento llamado fuzzificador realiza la conversión de valores discreto a términos difusos. Su salida es utilizada por el dispositivo de inferencia difusa para aplicarla a cada una de las reglas de la base de reglas, siguiendo el método de inferencia seleccionado. La salida del bloque puede ser M conjuntos difusos B^l , con $l=1,2,\dots,M$, o bien un único conjunto difuso B^l , que es la unión de los M conjuntos difusos, o bien M escalares Y^l , con $l=1,2,\dots,M$, si las reglas son del tipo Sugeno. Finalmente, el defuzzificador transformará estos conjuntos difusos en un valor no difuso.

3.11.14 Tipos de controladores difusos

La arquitectura del controlador a utilizar depende de la aplicación concreta a llevar a cabo. Consideraremos los siguientes tres grandes grupos de controladores:

1. Controladores difusos directos sin optimización
2. Controladores difusos directos con optimización.
3. Controladores difusos híbridos.

1. Controladores difusos directos sin optimización: La estructura típica de uno de estos controladores difusos es la que se muestra en la figura numero 24 (Estructura de un controlador). En ella, el primer bloque realiza el preprocesado de las variables de entrada para proporcionar las entradas al controlador difuso. En el caso más este preprocesado puede consistir en un simple escalado de las magnitudes que se miden.

Si el controlador se realiza digitalmente, normalmente con un microprocesador, alguna de las entradas es analógica, se necesitará amplificarla y convertirla a valores digitales con un circuito de acondicionamiento adecuado.

El tipo de preprocesado de las entradas define la clase de controladores; en este sentido, los tipos más usuales de controladores son:

1. Controlador proporcional $X = F(e)$
2. Controlador integral $X = F(s)$
3. Proporcional – derivativo $X = F(e, \Delta e)$
4. Proporcional – integral $X = F(e, s)$
5. Con Realimentación no lineal $X = F(R, S)$

Donde se denota con e el error, con Δe su derivada y con s su integral; R representa las variables de control y S las de salida del proceso. Los controladores de los tipos 1 al 4 han sido muy utilizados por su similitud con los controladores clásicos; permiten formular reglas independientes del punto de referencia R utilizando sólo el error e , su derivada Δe , o la integral s .

Por su parte, los controladores de tipo 5 permiten definir comportamientos diferentes según el punto de referencia. Esto resulta de especial importancia en el control de sistemas no lineales, en los que su comportamiento cambia según el punto de operación.

Este tipo de controladores permite también definir reglas para controlar el sistema en caso de averías o de funcionamiento anormal, que permitan llevarlo a un estado seguro sin grandes daños.

Los controladores directos permiten realizar control de sistemas utilizando una descripción lingüística de las reglas de control. Estas reglas han de obtenerse del conocimiento que disponen los expertos sobre el control del sistema, o bien por procedimientos heurísticos, siendo esta solución en muchos casos suficiente para obtener un buen control del sistema.

2. Controladores difusos directos con optimización: Cuando se precisa una solución más eficiente, o no se dispone del conocimiento que disponen los expertos, se utiliza estos controladores; estos parten de la estructura de los controladores difusos directos sin optimización, añadiendo elementos que permiten ajustar sus parámetros internos con el fin de mejorar su eficiencia. La siguiente es su estructura:

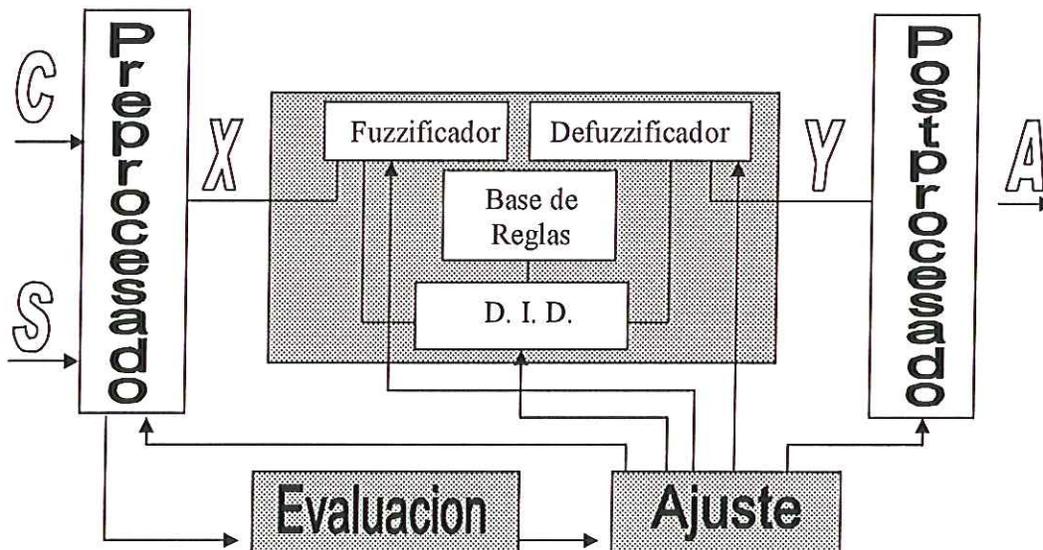


Figura 29. Estructura de un controlador difuso directo con optimización

Un primer elemento realiza la evolución del funcionamiento del controlador para permitir al bloque siguiente decidir sobre las modificaciones a realizar. El

bloque de evaluación puede calcular la sobreoscilación del sistema en torno al punto de trabajo, o el tiempo que tarda en estabilizarse el sistema tras una variación del mismo. Estos parámetros son utilizados por el bloque de ajuste para realizar las modificaciones necesarias en el FLC. Según el tipo de ajuste se distinguen diversos tipos de optimizaciones:

a. Controladores difusos auto-organizados: (Self-Organizing Controller), En esto controladores los ajustes se realizan en la base de reglas del FLC, Es un sistema capaz de modificar automáticamente, y sin intervención humana, su base de conocimientos. A partir de las discrepancias con respecto a unos determinados criterios prefijados (que calcula el bloque de evaluación), el bloque de ajuste del control autoorganizado establece las oportunas modificaciones en la base de reglas. Estos controladores introducidos por Mamdani en 1979 se están mostrando en multitud de aplicaciones; por ejemplo para el control de robots. Los enfoques seguidos para el desarrollo de los controladores difusos auto-organizados se han basado en criterios de evaluación local, es decir, orientados a acciones de control individuales.

El bloque de ajuste suele ser a su vez un FLC que implementa una tabla de decisión que, en función de los criterios de evaluación, devuelve una indicación sobre la corrección requerida respecto a la respuesta ideal. Frecuentemente, este mecanismo de ajuste no modifica en realidad las reglas ya adquiridas, sino que incluye otras nuevas en la base de reglas. Por ello estos controladores presentan una serie de problemas relacionados con la convergencia del algoritmo, la generación de un excesivo número de nuevas reglas de control, la falta de optimización del protocolo lingüístico entre otras.

Parte de los problemas originados por la continua generación de reglas para cada operación, pueden ser eliminados diseñando sistemas de evaluación alternativos, limitando el número de términos en los antecedentes, e incluyendo modificadores con capacidad de optimización del protocolo de control.

b. Controladores difusos con autoaprendizaje: En éstos controladores no se modifican los términos lingüísticos, sino que se ajustan los parámetros escalares del controlador, o de los bloques de preprocesado o postprocesado. En su mayor parte responden a procedimientos y técnicas de aprendizaje del tipo conocido, descenso por el gradiente, similar al utilizado para los modelos de redes neuronales artificiales. En la mayoría de los casos el ajuste se centra en modificar las funciones de inclusión de las particiones de salida y, con menos frecuencia, las entradas; al modificar estas funciones se ajusta el significado dado a las reglas, sin cambiar la estructura definida por el experto en el control del sistema.

c. Controladores basados en modelado borroso: Estos son los controladores que establecen modelos difusos del proceso a controlar. Esta técnica tiene sus orígenes en los primeros trabajos de Takagi y Sugeno, sobre identificación de sistemas mediante lógica difusa y su aplicación al modelado de sistemas.

La aplicación de las técnicas de modelado precisan una serie de simplificaciones sobre los parámetros relativos a antecedentes y consecuentes. Básicamente los sistemas de control basados en modelos difusos actúan como modeladores de la dinámica inversa del proceso. Este modelo puede ser realizado fuera de línea, o bien realizarse en tiempo real mediante un proceso de autoaprendizaje.

El control por modelado difuso se ha utilizado en diversas aplicaciones, como el control de un grupo de elevadores y la predicción de demanda eléctrica.

3. **Controladores difusos híbridos:** Se denominan así aquellos sistemas de control formados por dos controladores interconectados, de los cuales uno es convencional (como los PID) y el otro es difuso. El primero se encarga básicamente del control, garantizando un comportamiento estable, mientras que el controlador difuso actúa en paralelo, introduciendo el componente heurístico en el proceso.

Este segundo controlador difuso también puede emplearse para el ajuste de los parámetros del controlador convencional; usualmente, sus acciones se orientan a la mejora de ciertas características, como reducción de oscilaciones, mejoras del tiempo de establecimiento entre otras.

Las primeras referencias a este tipo de estructuras aparecen sin duda alguna a nivel industrial, una buena parte de los reguladores difusos industriales han sido realizados mediante esta técnica de hibridación. Estas estrategias han sido muy utilizadas en la industria; por su similitud con los controladores clásicos, el técnico de proceso se siente apoyado por su propia experiencia con controladores convencionales, y a su vez, se adapta a los nuevos planteamientos introducidos por los controladores difusos. En sectores como la industria química y nuclear, en donde la seguridad del funcionamiento es fundamental, se han utilizado estos controladores por estar bien establecido su funcionamiento.

3.11.15 Implementación de sistemas difusos

El diseño de un controlador basado en lógica difusa supone establecer un compromiso entre diversos criterios de diseño: velocidad, precisión y flexibilidad, principalmente. Para conseguir los resultados deseados debe plantearse la velocidad de respuesta del sistema de control, la cual vendrá limitada por otros factores, como el grado de precisión requerido o la flexibilidad del diseño. Así, si deseamos una alta precisión en el control necesitaremos una gran cantidad de conjuntos para cada variable y un alto número de reglas, lo que exigirá una elevada cantidad de cálculos, causando aumento del tiempo de respuesta.

Si además deseamos que el sistema de control tenga flexibilidad de adaptación a los cambios del sistema y aprender de los errores cometidos, serán

necesarios muchos más cálculos adicionales, que también aumentarán el tiempo de respuesta. Evidentemente, estas opciones influyen en el coste del sistema final, y en muchos casos será ésta la mayor restricción del diseño.

Una vez decididas las prestaciones requeridas, se ha de utilizar una herramienta de desarrollo para el diseño del sistema y seleccionar la plataforma de implementación adecuada. Una de las principales ventajas de los sistemas de inferencia difusa para control es la simplicidad de su implementación en microcontroladores convencionales de 8 bits. Es de destacar que en el caso de las redes neuronales ello no suele ser posible, debido a los elevadísimos recursos de cálculo (procesamiento y memoria) que requieren.

En general, puede afirmarse que aquellos sistemas en los cuales los tiempos de respuesta del controlador sean del orden o mayores de medio segundo, pueden ser realizados programando el sistema de control difuso en microcontroladores convencionales de 8 bits. Obviamente el tiempo de respuesta del controlador difuso dependerá del tiempo necesario para la evaluación de las reglas y la inferencia de las salidas.

Una de las operaciones más críticas a realizar en cuanto a recursos requeridos es la defuzzificación, pues el método del centroide requiere cierta capacidad de cálculo, Para la aceleración de su ejecución resulta de gran ayuda disponer de instrucciones eficientes de multiplicación y acumulación, que algunos microcontroladores, o versiones especiales, pueden realizar como el 68HC11 de Motorola. También resultan muy interesantes para estas aplicaciones los DSP (como los TMS320 de Texas Instruments) pues, incluyen un módulo específico para la realización de la operación MAC (multiplicación y acumulación) de gran importancia en el campo del procesamiento de señal, pero también para la emulación de sistemas difusos.

3.11.16 Aplicaciones de los sistemas difusos

La primera aplicación práctica operativa de la lógica difusa la desarrolló E. Mamdani en Europa, realizando el control difuso de un sistema de vapor de una planta industrial. Otra de las más clásicas quizás sea la de Smidth y otros, que en 1980 aplican técnicas de lógica difusa al control de hornos rotativos en una cementera. El control en planta industrial sigue siendo hoy en día uno de los campos de aplicación más destacables.

Los sistemas basados en lógica difusa se viene utilizando en aplicaciones procedentes de diversos campos, Así en el área médica se emplea en diagnóstico, acupuntura, análisis de ritmos cardíacos, o de la arterioestenosis coronaria. Dentro del apoyo a la toma de decisiones, otra de las grandes áreas de aplicación de estos sistemas, se han utilizado, por ejemplo, en la búsqueda de caminos críticos en al ejecución de proyectos, y asesoramiento a al inversión. Sin duda, el principal campo de aplicación de la lógica difusa es el

de control, a partir del empleo de las expresiones de lógica difusa para formular reglas orientadas al control de sistemas. Dichos sistemas de control difuso pueden considerarse una extensión de los sistemas expertos, pero superando los problemas que éstos presentan para el razonamiento en tiempo real, ocasionados por la explosión exponencial de las necesidades de cálculo requerido para un análisis lógico completo de las amplias bases de reglas que éstos manejan.

En el campo de control de sistemas en tiempo real destaca el control de un helicóptero por órdenes pronunciadas de viva voz, y el control con derrapaje controlado de un modelo de coche de carreras. Dentro del sector del automóvil existen gran número de patentes sobre sistemas de frenado, y cambio de marcha automáticos.

El área de aparatos de consumo es otra de las más destacables, hasta el punto de que no es raro encontrarse con propaganda del tipo incluye inteligencia artificial fuzzy, en escaparates o en catálogos (Por ejemplo en cámaras de video, tensiómetros etc.). En el sector de los electrodomésticos se han diseñado un buen número de aplicaciones neuro-difusa como lavadoras, tostadoras de pan, controles de calefacción y aires acondicionados.

Para el control de maquinaria destaca el ya clásico control de frenado del metro de Sendai (Japón), realizado por Hitachi, y que opera desde julio de 1987. Se han aplicado sistemas difusos en el control de una máquina de perforación de túneles grúas para contenedores. Se han aplicado también al procesado de imágenes y reconocimiento de caracteres, al igual que en la parte de robots móviles y navegación autónoma.

3.12 CALIBRACION DE LOS INSTRUMENTOS

Se ha visto que los instrumentos industriales pueden medir, transmitir y controlar las variables que intervienen en un proceso. En la realización de todas estas funciones existe una relación entre la variable de entrada y la salida del instrumento. Así pues, un instrumento o una de sus partes pueden considerarse como dispositivos de conversión de señales que pasan de una variable de entrada a una o varias de las funciones de salida.

Existirá, pues, una correspondencia entre la variable de entrada y la de salida, representando esta última el valor de la variable de entrada. Siempre que el valor representado corresponda exactamente al de la variable de entrada el instrumento estará efectuando una medición correcta.

En la práctica, los instrumentos determinan en general unos valores inexactos en la salida que se apartan en mayor o menor grado del valor verdadero de la variable de entrada, lo cual constituye el error de la medida.

El error es universal e inevitable y acompaña a toda medida, aunque ésta sea muy elaborada, o aunque se efectúe un gran número de veces. Es decir, el valor verdadero no puede establecerse con completa exactitud y es necesario encontrar unos límites que lo definan, de modo que sea práctico calcular la tolerancia de la medida.

3.12.1 Errores de los instrumentos

Un instrumento representativo, se considera que está bien calibrado cuando en todos los puntos de su campo de medida, la diferencia entre el valor real de la variable y el valor indicado o registrado o transmitido, está comprendida entre los límites determinados por la precisión del instrumento.

En un instrumento ideal (sin error), la relación entre los valores reales de la variable, comprendidos dentro del campo de medida, y los valores de lectura del aparato, es lineal. Esta relación se puede ver en la siguiente figura:

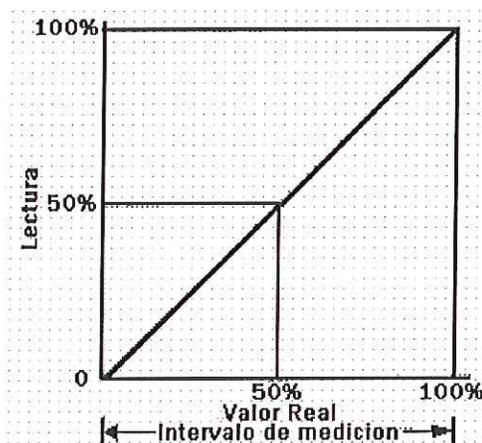


Figura 30. Relación de calibración en un instrumento

En Condiciones de funcionamiento estático, las desviaciones respecto a la relación lineal indicada, dan lugar a los errores de calibración de los instrumentos, suponiendo que estas desviaciones no superan la exactitud dada por el fabricante del instrumento, ya que en ese caso consideraríamos el instrumento calibrado aunque no coincidiera exactamente la curva lectura vs variable real con la recta ideal. Las desviaciones de la curva lectura vs variable real de un instrumento típico:

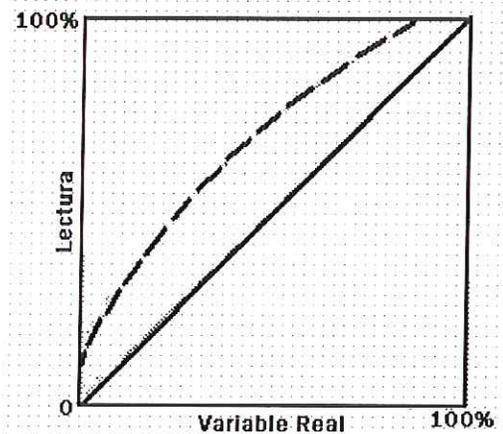


Figura 31. Relación de desviación en la calibración en un instrumento

- Error de cero: todas las lecturas están desplazadas un mismo valor con relación a la recta representativa del instrumento. Este tipo de error puede verse en la siguiente grafica

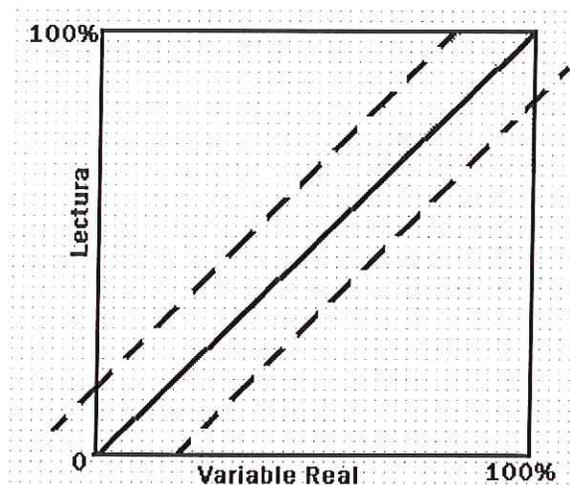


Figura 32. Error de cero

En esta se observa que el desplazamiento puede ser positivo o negativo. El punto de partida o de base de la recta representativa cambia sin que varíe la inclinación o la forma de la curva.

- Error de multiplicación: todas las lecturas aumenta o disminuyen progresivamente con relación a la recta representativa, según puede verse a continuación. En la que se observará que el punto base no cambia y que la desviación progresiva puede ser positiva o negativa.

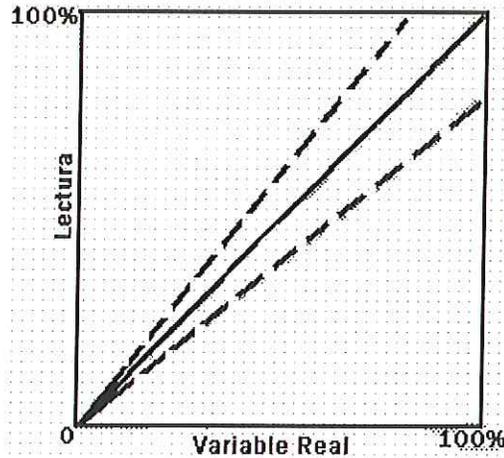


Figura 33. Error de multiplicación

- **Error de angularidad:** La curva real coincide con los puntos 0 y 100% de la recta representativa, pero se aparta de la misma en los restantes. En la siguiente figura puede verse un error de este tipo. El máximo de la desviación suele estar hacia la mitad de la escala.

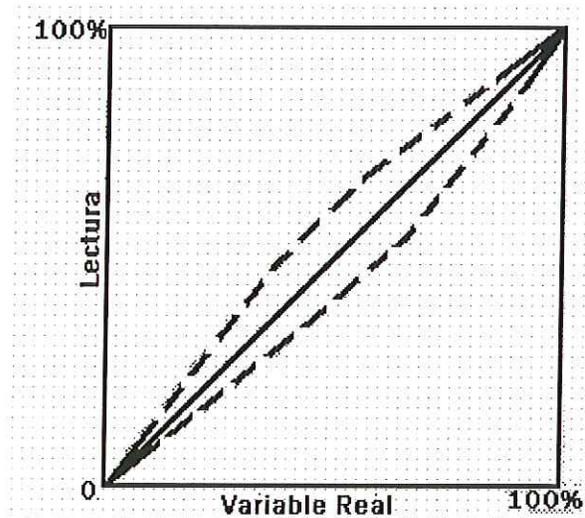


Figura 34. Error de angularidad

3.12.2 Calibración de los instrumentos de caudal

Los rotámetros para líquidos se comprueban haciendo pasar agua, de modo tal que la indicación del rotámetro se mantenga en un valor constante y recogiendo el agua en un tanque de capacidad conocida o en un depósito colocado sobre una báscula. Esta capacidad dividida por el tiempo transcurrido en la experiencia dará el caudal, que deberá coincidir con la indicación del

rotámetro, teniendo en cuenta naturalmente las correcciones de peso específico, temperatura y viscosidad del fluido real comparado con el agua.

La comparación del rotámetro puede realizarse también intercalando otro rotámetro de precisión en serie y comparando las dos indicaciones.

3.13 LABWINDOWS / CVI

LabWindows/CVI es un software desarrollado por National Instruments que permite la realización de aplicaciones en lenguaje C que se ejecuten en los entornos Windows 3.1, Windows 95 y Windows NT.

Contiene un entorno interactivo para el desarrollo de programas conformado por: Editor y compilador de lenguaje C, librerías para crear aplicaciones de adquisición de datos y de control, herramientas que permiten realizar la adquisición, el procesamiento y la representación de datos.

Dentro del entorno interactivo se pueden editar, ejecutar y depurar programas escritos en ANSI C utilizando las funciones de las librerías. Los programas desarrollados en LabWindows/CVI, que deben seguir las pautas establecidas por el ANSI C, pueden estar formados por módulos desarrollados en C, por las propias librerías incluidas en el entorno, y por módulos o librerías desarrolladas con otros compiladores.

La verdadera potencia de LabWindows/CVI reside en sus librerías ya que permiten utilizar funciones de adquisición y control de instrumentación programable así como tarjetas de adquisición de datos.

Para adquisición de datos existen seis librerías: Librería de control IEEE-488 o GPIB, Librería de adquisición de datos (NIDAQ: National Instruments Data Acquisition), Librería de comunicaciones serie RS232/RS485, Librería VXI (Vme eXtension for Instrumentation), Librería VISA (Virtual Instrument Standard Architecture), Librería de control de instrumentos programables.

Para análisis o tratamiento de datos existen tres librerías: Librería de entrada/salida estándar (Distinta de la stdio del ANSI C), Librería de análisis matemático, Librería para el procesamiento digital de la señal.

Para la representación de datos LabWindows/CVI ofrece una librería gráfica específica denominada interfase de usuario (User Interface Library) que contiene los elementos gráficos a través de los cuales el usuario se comunica con la aplicación.

Finalmente para las comunicaciones entre procesos y redes se proporcionan librerías de manejo de DDE (Dynamic Data Exchange) y de TCP/IP (Transmisión Control Protocol).

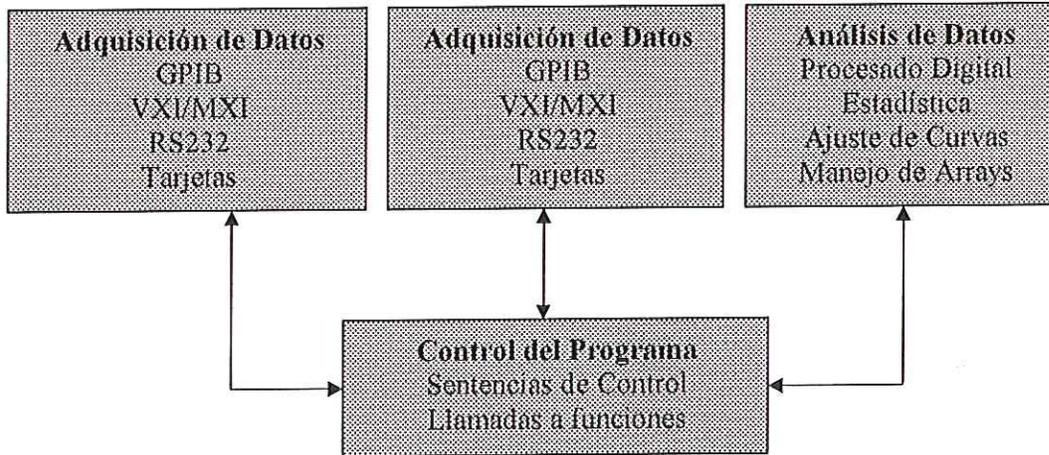


Figura 35. Estructura de un programa en LabWindows/CVI

3.14 SERVOMOTORES

Los servomotores pueden ser neumáticos, eléctricos, hidráulicos y digitales, si bien se emplean generalmente los dos primeros por ser más simples, de actuación rápida y tener una gran capacidad de esfuerzo.

3.14.1 Servomotor eléctrico

Es un motor eléctrico acoplado al vástago de la válvula a través de un tren de engranajes. El motor se caracteriza fundamentalmente por su par y por el tiempo requerido para hacer pasar la válvula de la posición abierta a la cerrada y viceversa. Existen básicamente tres tipos de circuitos eléctricos de control capaces de actuar sobre el motor: todo-nada, flotante y proporcional.

El circuito proporcional está formado por un motor bidireccional, un relé de equilibrio y un potenciómetro de equilibrio. El controlador es un potenciómetro cuyo brazo móvil se mueve de acuerdo con el valor de la variable del proceso.

Si el par necesario es grande, es preferible emplear un motor de corriente continua que tiene la ventaja adicional de reducir la energía cinética del movimiento, gracias a la miniaturización del circuito impreso. Sin embargo, presenta el inconveniente de precisar inevitablemente de conmutador y escobillas que influyen adversamente en su mantenimiento.

4. MONTAJE FISICO

El sistema esta compuesto por dos intercambiadores de calor, uno de tubos concéntricos y el otro de cascos y tubos, a los cuales se les implemento un control automático de la temperatura y el caudal a la carga de la corriente de calentamiento.

Este control se realizo a través de dos válvulas proporcionales, una a la entrada del agua, que es la encargada de mantener el valor de consigna del agua y la otra que se instalo en la línea de entrada del vapor (fuente de calor), que se encarga de mantener la cantidad de vapor necesario para lograr la temperatura de consigna.

La medición del caudal se realizo mediante un sensor de paleta rotativa, y la medición de la temperatura mediante termocuplas. Las señales suministradas por estos sensores son adquiridas mediante un banco de Field Point, el mismo que se encarga de enviar la señal a las válvulas de control, luego de ser procesados los datos por el controlador.

4.1 SELECCIÓN DE ELEMENTOS

4.1.1 Válvulas de control

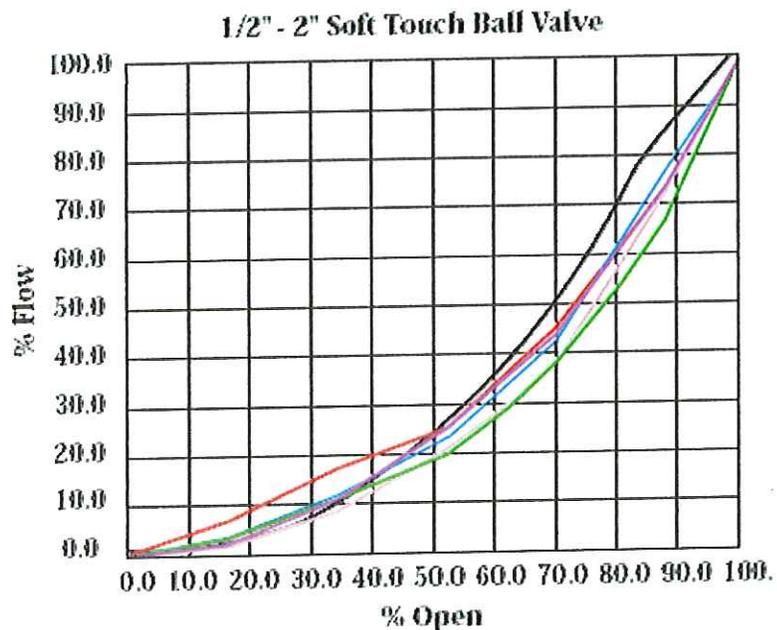
Las válvulas que se seleccionaron, son válvulas de la compañía DELTA CONTROL PRODUCTS INC, en su línea ST VALVULAS DE BOLA (SoftTouch Ball Valves). Válvulas que funcionan a 24 voltios de corriente continua y con una señal de control de 0 a 20 mA o de 0 a 10 Voltios. Estas válvulas combinan múltiples Cv's y bajos torques, lo que le permite precisión en el control. El bajo torque se consigue gracias a los asientos resistentes que esta tiene, la buena compresión del resorte y la rotación de la bola. Esto le asegura que nunca se tenga la necesidad de múltiples actuadores o actuadores de más de 44 pulgadas por libra (en seco).

Los asientos de teflón elástico reforzado que contiene son usados para reducir el torque requerido para mover la válvula. Estos asientos tienen una ranura en la vía exterior en donde es fija un O-ring, obteniendo una sola unidad, elástica y resistente.

Esta válvula tiene una facilidad para manejar manualmente, trae menos conexiones que otras válvulas de su tipo, y es de un bajo costo. Estas válvulas pueden ser utilizadas tanto en agua fría como en agua caliente; cuando la temperatura no excede los 250° F [125 °C], la composición del fluido excede el 50% de glycol y la presión máxima no pasa de los 360 PSI; la válvula exhibe

las mismas características en cuanto a porcentaje de fluido a través de toda la señal de control que se puede utilizar [0-10 v] o [0-20 mA].

En la siguiente grafica se puede observar el comportamiento de la válvula en este aspecto mencionado anteriormente.



Color Code	Size	Model No.
—	1/2"	ST 05-2-03
—	3/4"	ST 75-2-10
—	1"	ST 1-2-15
—	1-1/4"	ST 125-2-37
—	1-1/2"	ST 150-2-41
—	2"	ST 2-2-71

Figura 36. Relación de las válvulas de control deltapc, % de fluido vs. % de abertura

Las válvulas son calibradas una a una, y se ajustan para ser precisas, alrededor de más o menos el 5% del rango de flujo, si es instalada correctamente.

La operación de esta depende de las características del fluido, es por esto que se hace necesario indicar sus características. La gravedad específica es el atributo más importante, seguido de la viscosidad y la temperatura, pues la viscosidad depende de la temperatura, aunque en algunos fluidos como el agua esto no ocurre.

Estas válvulas tienen tres elementos muy importantes dentro de su funcionamiento:

- Delta port noryl^R: Es el elemento, o el puerto que se prensa en la bola de la válvula a unas 200 libras de fuerza, y sirve como acoplamiento para el eje del actuador. Gracias a este puerto, la válvula logra incorporar 51 valores únicos de Cv's; a demás gracias a sus buenas propiedades físicas, la válvula tiene buena resistencia al calor; resiste temperaturas continuas de uso, por encima de los 110°C. A demás un buen dimensionamiento, precio moderado, obtiene una estabilidad dimensional a largo plazo, entre muchas otras características mas.



Figura 37. Delta port noryl^R de una válvula de control deltacp

El material utilizado para la construcción de este puerto, es el NORYL, y tiene muy buenas propiedades de aislamiento eléctrico, debido a la poca capacidad de absorción de agua que tiene, valores por debajo del 0.07%.

- Fit pin: Es un pin antirrotación que usa el actuador de la válvula, el cual contrarresta los efectos del torque a la actuación de la válvula. A demás este pin previene la condensación que puede buscar al actuador, y ocasionar daños, también sirve como aislante térmico. Este Pin, tiene unos dientes en el acople con el actuador, que previene el resbalamiento, y tiene impreso en su parte inferior unas flechas que indican si la válvula esta cerrada o abierta. Si la flecha es recta indica que la válvula esta abierta, y si la flecha es curva, indica que la válvula esta cerrada.

Y en la parte superior, tiene un indicador que ayuda a determinar la posición de la válvula, si este indicador esta paralelo a la válvula, indica que esta abierta.

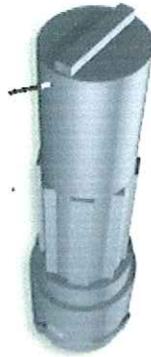


Figura 38. Fit pin de una válvula de control deltap

- O-rings: Son los encargados de garantizar la estanqueidad de la válvula, estos no se deben doblar, forzar o enrollarse sobre esquinas filosas. La limpieza es importante para un adecuado funcionamiento de los sellos y una larga vida para los o-rings. Partículas de mugre o metales pequeños en la ranura de los o-rings, pueden ocasionar daños que ocasionan fugas.

Para su protección se debe usar silicona o lubricantes de grasa; no se debe usar aerosoles o lubricantes a base de petróleo.



Figura 39. O-rings de una válvula de control deltap

4.1.1.1 CONSEJOS DE INSTALACION

- Se debe limpiar la tubería aguas arriba de la parte donde se va a instalar la válvula.
- Es recomendado instalar una malla (colador) aguas arriba, para atrapar la mugre que pueda ingresar al sistema.
- Se debe eliminar el aire de las tuberías.
- Las válvulas se deben ser instaladas solo vertical o horizontalmente.

- No es necesario que aguas arriba y aguas debajo de la válvula no exista ningún tipo de accesorio en la tubería (cualquier accesorio puede ser conectado directamente a las válvulas).
- Se debe instalar según indique la flecha; flecha que siempre indica el sentido que debe tener el fluido. Y siempre debe cumplir con lo siguiente:

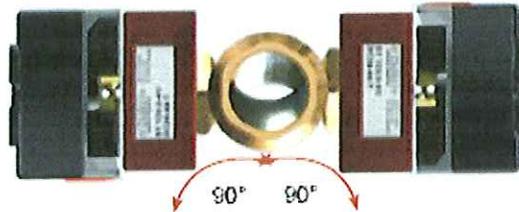


Figura 40. Consejo de instalación para una válvula deltapc

- Plano de la válvula

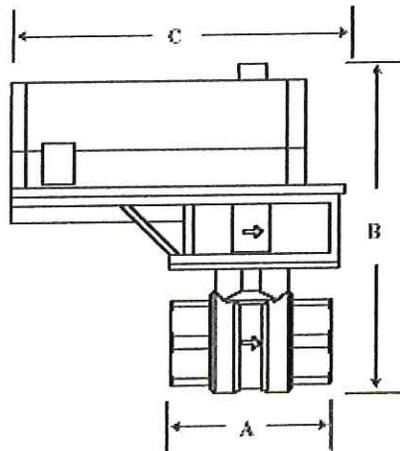


Figura 41. Plano de la válvula de control

Tabla 2. Dimensiones de la válvula de control

Modelo	Tubería	Cv	A	B	C	D
ST-1-2	1"	9	2.6"	5.6"	5.4"	2.8"

La válvula para vapor es del modelo BV05-2-10/DM24-53 de 1/2" de diámetro, y la válvula para agua fría modelo ST-1-2-44 /DM24-53 diámetro 1". Estas válvulas fueron seleccionadas mediante el siguiente procedimiento:

1. Se determina el Cv con el cual se va a trabajar a través de la siguiente formula:

$$Cv = \frac{Q * \sqrt{G}}{\sqrt{\Delta P}}$$

Donde:

- Q es el valor del caudal que pasara por la válvula en GPM.
 - G es la gravedad específica del fluido que pasa por la válvula.
 - ΔP es la presión que va a pasar a través de la válvula en PSI.
 - Cv es el coeficiente de flujo.
2. Una vez obtenido el Cv, y mediante unas tablas disponibles en la pagina Web de la compañía que diseña y fabrica las válvulas se obtiene el tamaño de la línea y el valor del Cv que mas se acerque al suyo.
 3. Luego de tener el nuevo Cv, se determina la presión a la cual ira a trabajar la válvula mediante la siguiente ecuación:

$$\Delta P = \left(\frac{Q * \sqrt{G}}{Cv} \right)^2$$

4. Si la presión resultante en este punto es favorable para su sistema, esa válvula es la que debe pedir. La referencia se encuentra en la misma tabla de donde se escogió el Cv.

4.1.1.2 CRITERIOS Y ANÁLISIS DE SELECCIÓN

Para la selección de las válvulas de control, se tuvo en cuenta el criterio económico, pues estas, se adecuan al presupuesto establecido en el proyecto y son de mas bajo costo en comparación de otras similares.

El aspecto de facilidad en su instalación y mantenimiento, fue otro de los criterios que se evaluaron, pues son válvulas que no necesitan ningún tipo de requerimientos físicos del sistema para ser instaladas, son válvulas que se adecuan satisfactoriamente a las características del ambiente en el cual funciona el sistema, pues están construidas de materiales resistentes y que aseguran una estanqueidad suficiente; además estas funcionan correctamente en la estrangulación del tipo de fluidos que circulan por el sistema y necesitan menos cables para su conexión que otras válvulas del mismo tipo.

Por otro lado una de las características mas importantes de estas válvulas, es la poca inercia y bajo torque que presentan al momento de ser activadas, gracias al mecanismo que estas traen.

De igual forma, se cuenta con soporte técnico en el país, para el momento que se presente algún tipo de contratiempo con las mismas. Estas válvulas, dentro de su comportamiento exhiben las mismas características en cuanto a porcentaje de fluido a través de toda la señal de control que se puede utilizar, lo cual asegura un buen funcionamiento en la estrangulación del fluido.

4.1.2 Sensor de caudal

Se escogió un sensor de caudal de paleta rotativa marca KOBOLD modelo DRG1130N5F300, salida por pulsos 265Hz a F.S. con rosca de 3/4" NPT con rango de 5 a 90 LPM en cuerpo de Aluminio-Bronce.



Figura 42. Sensor de caudal de paleta rotativa marca kobold

Los medidores de caudal con paleta rotatoria KOBOLD serie DRG son usados para la medición y el monitoreo de líquidos ligeramente viscosos.

Los medidores de caudal serie DRG trabajan de acuerdo al muy conocido principio de paleta rotatoria. Una magneto acoplada en la paleta y herméticamente sellada del medio, transmite sin contacto el movimiento rotatorio a un sensor de Efecto hall montado en la cubierta. El sensor convierte el movimiento rotatorio, que es proporcional al caudal, en una señal de frecuencia. Una unidad electrónica conectada en serie envía la señal a una salida analógica, a contactos límite o a una pantalla.

Campos de aplicación

- Monitoreo de agua de refrigeración.
- Maquinaria para la agricultura
- Industria de placas de circuitos impresos.

La configuración eléctrica, de la unidad de salida analógica se observa en la figura 40, es un conector de enchufe, M1 2x1:

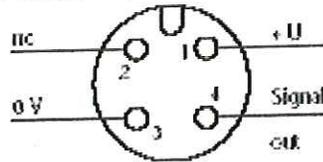


Figura 43. Configuración eléctrica del sensor de caudal

Este sensor tiene una precisión de medida de más o menos el 3% de la cantidad real del fluido, y tiene una pérdida máxima de presión de 1 bar, a

máxima capacidad. Este sensor se alimenta con 24 V_{dc} y tiene un consumo máximo de 15mA. La salida de los pulsos, son mediante un transistor PNP, de colector abierto de 25mA; y tiene tienen una razón de división de 1:2 y de 1:4.

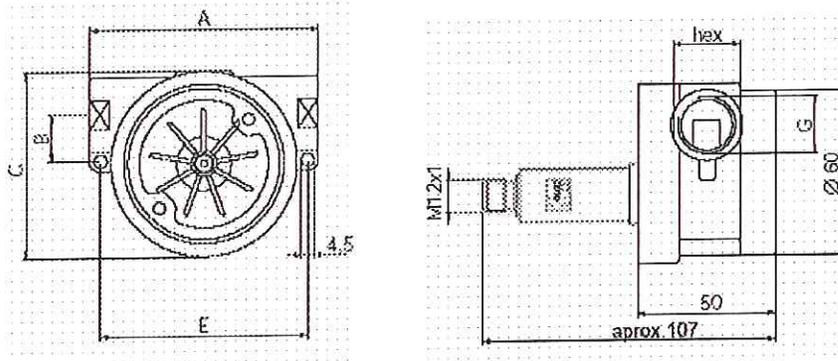


Figura 44. Plano del sensor

Tabla 3. Dimensiones del sensor de caudal

G	A	B	C	E	Hex
3/4"	100 mm	25 mm	69.5 mm	90 mm	38 mm

Es de vital importancia, para el perfecto funcionamiento del sensor, que 10 diámetros (3/4"), aguas abajo y 15 diámetros aguas arriba del sensor, no se instale ningún tipo de accesorio, diferente a la tubería recta. Esto para asegurar un estado laminar en el fluido que se va a medir.

4.1.2.1 CRITERIOS Y ANÁLISIS DE SELECCIÓN

El sensor de caudal seleccionado, cumple con los requerimientos del sistema, primero, en cuando a que su rango de medida, contiene la cantidad máxima de caudal que por el sistema circula; de igual forma el sensor también se adecua perfectamente al dispositivo de adquisición de datos, pues la señal que el sensor envía, (Pulsos), se puede adquirir por el modulo de Field Point FP-CTR-500, con el que se cuenta. Además, se observo el hecho que este medidor sea un sensor inteligente, pues combina la función de detección, con las funciones de procesamiento de señales y comunicación.

El criterio económico, tan bien fue determinante, para la selección del sensor, ya que, entre los sensores de su clase, este, es de los mas económicos. De igual forma, otra de las mas importantes características que ayudaron a la elección de este medidor, es que cuenta con un sensor interno basado en el efecto hall, el tiene la ventaja de que su salida es independiente de la velocidad de variación del campo magnético, lo cual asegura fidelidad en el dispositivo, y también asegura, por su elemento hall, la inmunidad a las condiciones ambientales, como contaminación por polvo, humedad y vibraciones, lo cual determina características constantes.

La ausencia de contactos, cuando se aplica a la detecciones de elementos, les confiere mayor robustez que la que tienen los sensores donde aquellos están sometidos a desgaste y son una fuente de interferencias por la presencia de arcos eléctricos.

Por otro lado, el sensor de caudal tiene las tres características más importantes para describir el comportamiento estático del mismo, exactitud, fidelidad y sensibilidad.

4.1.3 Sensor de temperatura

Para sensar la temperatura tanto de la salida como de la entrada de los intercambiadores de calor, se utiliza alambre de extensión de termopar tipo K (Aleación de Cromel-Alumel) en PVC calibre 20 referencia K20/5/502.

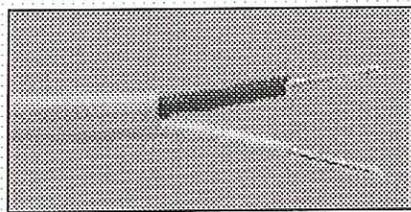


Figura 45. Alambre de extensión de termopar tipo k

Esta referencia de la extensión de termocupla que se utilizo, se divide en tres partes y tiene el siguiente significado:

La primera sección conformada por una letra y un número de dos cifras. La letra que se designa a través de las normas ASTM E 230, de acuerdo al tipo de alambre que se utiliza. Los siguientes dos numero indican el calibre del alambre utilizado. Para nuestro caso, calibre 20.

La segunda parte contiene un solo número. De acuerdo al tipo de sensor (si es termocupla o alambre de extensión de termopar), a la tolerancia y a la contextura del alambre. Para el caso de nosotros, es un alambre de extensión de termopar sólido de tolerancia estándar. Y la tercera parte, consiste e un número de tres cifras, mediante la cual la compañía (KOBOLD), de acuerdo al tipo de aislamiento que tenga lo identifica. Para el caso nuestro una de la serie 502 (Aislamiento en PVC).

Esta serie tiene el asilamiento en PVC tanto en la parte primaria, como en la parte exterior. Esta diseñada para trabajar hasta con temperaturas iguales a 105 °C continuamente.

Esta es muy utilizada en muchos sistemas industriales debido a su flexibilidad y sencilla instalación. Esta tiene excelente resistencia a la humedad, buena abrasión y buena resistencia química.

Algunas de sus aplicaciones: • Laboratorios. • Equipos industriales de muestreo. • Automóviles.

4.1.3.1 CRITERIOS Y ANALISIS DE SELECCIÓN

En la selección del tipo de sensor de temperatura a utilizar, se tuvo en cuenta aspectos como el económico, la instalación, la adquisición de la señal que producen al sensar la temperatura, la precisión, la fiabilidad, su rango de medida, su resistencia ante medio ambientes industriales, entre otros.

- El costo: Las termocuplas mas económicas, son aquellas que están hechas de metales de bajo costo, conocidos como metales base. Entre estas se encuentran las termocuplas de tipo E, J, K, N y T. La de mas bajo precio es la termocupla tipo K seguida de la tipo J. Estas son económicas, exactas y de mucha utilidad en la mayoría de aplicaciones industriales. La mayoría de los controladores industriales utilizan uno o los dos tipos de termocuplas.

- Rango de temperatura: Obviamente, este es el aspecto más importante, la temperatura de operación del sistema a medir, es la que dicta, que tipo de termocupla se debe escoger. En el caso de nuestro sistema, todas las termocuplas, no sirven, por lo cual este aspecto, no fue importante en el momento de escoger la termocupla que se utilizo.

Tabla 4. Temperatura máxima de resistencia para los diferentes tipos de termocuplas

Tipo de Termocupla	Metal que contiene en el brazo positivo	Metal que contiene en el brazo negativo	Rango de Temperatura
B	70.4% Platino (Pt) 29.6% Rodio (Rh)	93.9% Platino (Pt) 6.1% Rodio (Rh)	870-1700 °C
E	90% Níquel (Ni) 10% Cromo (Cr)	55% Cobre (Cu) 45% Níquel (Ni)	0-900 °C
J	99.5% Hierro (Fe)	55% Cobre (Cu) 45% Níquel (Ni)	0-750 °C
K	90% Níquel (Ni) 10% Cromo (Cr)	95% Níquel (Ni) 5% Varios Elementos	0-1250 °C
N	84.4% Níquel (Ni) 14.2% Cromo (Cr) 1.4% Silicona	95.5% Níquel (Ni) 4.4% Silicio (Si)	0-1250 °C
R	87% Platino (Pt) 10% Rodio (Rh)	100% Platino (Pt)	0-1450 °C
S	90% Platino (Pt) 10% Rodio (Rh)	100% Platino (Pt)	0-1450 °C
T	100% Cobre (Cu)	55% Cobre (Cu) 45% Níquel (Ni)	-200-350 °C

- Exactitud (Tolerancia): Es definida como la medida del error que existe en la medición de la temperatura. Esta identifica que tan cerca está el valor medido, del valor real de la temperatura. Esta también es llamada como la tolerancia.

Tabla 5. Tolerancias de los diferentes tipos de termocuplas

Tipo de Termocupla	Temperatura Máxima	Tolerancia	
		Estándar	Especial
E	900 °C	± 0.5% (1.7 °C)	± 0.4% (1 °C)
J	750 °C	±0.75% (2.2 °C)	±0.4% (1.1 °C)
K,N	1250 °C	±0.75% (2.2 °C)	±0.4% (1.1 °C)
T	350 °C	±0.75% (1.0 °C)	±0.4% (0.5 °C)
B	1700 °C	±0.5%	-----
R,S	1450 °C	±0.25% (1.5 °C)	±0.1% (0.5 °C)
C,D,G	2315 °C	±1% (4.5 °C)	-----

En esta tabla se puede observar que la termocupla tipo k, que fue la que se selecciono, tiene una tolerancia de $\pm 0.75\%$ (2.2 °C), lo cual es adecuado, para el sistema.

Por otro lado cabe resaltar que la termocupla tipo K, tiene una resistividad elevada con lo cual logra tener una resistencia alta sin requerir mucha masa, lo cual implicaría alta capacidad calorífica y respuesta lenta; tienen resistencia a la oxidación a temperaturas altas, y puede tolerar la atmósfera donde va a estar, de igual forma resiste aplicaciones de alta presión y es fiable a la hora de la medición.

4.1.4 Adquisición de datos (field point)

Para la adquisición de los datos en este proyecto, utilizamos la tecnología del Field Point de la National Instruments, que consiste en un sistema modular, diseñado para aplicaciones industriales en la medición, el control y el registro de datos; este sistema es de fácil instalación y configuración y tiene la ventaja de trabajar en tiempo real.

El Field Point otorga libertad, facilidad y rapidez en la medición de señales enviadas por sensores cercanos, evitando tanto inconvenientes como altos costos en el alambrado punto a punto.

A través de la utilización de esta tecnología, se pueden crear sistemas poderosos con grandes capacidades para el control y el procesamiento de señales. Los bancos de Field Point se pueden conectar a otros dispositivos tales como computadores, redes industriales, usando Ethernet, puertos RS 232 y RS 485, tecnología de Field Bus entre otros.

Este sistema proporciona alta certeza, y contiene módulos individuales para la entrada y salida de señales tanto análogas como digitales, para la conexión directa de sensores y actuadores en ambientes industriales.

Entre sus principales características están:

1. **Bajo costo y facilidad de instalación:** Este baja los costos del sistema, pues incluye el software y el hardware, lo cual facilita su instalación y mantenimiento.
2. **Es un sistema modular:** Este sistema tiene tres clases de dispositivos.
 - a. **Módulos de entradas y salidas (I/O):** La tecnología del Field Point, tiene 2 tipos generales de módulos, de 8 o 16 canales, que pueden ser estándar o canales duales. Estos módulos sirven como entrada o salida de señales y de diferentes tipos de sensores.
 - b. **Bases Terminales:** Estas bases terminales son los dispositivos donde se conectan los módulos de I/O; estas bases tienen los terminales para la conexión de los sensores, la conexión con la fuente de poder y la comunicación con los demás módulos.
 - c. **Network Módulos:** Estos módulos son los que proveen al sistema la conexión con redes industriales o terminales como PC's. Además está encargado de la comunicación de los módulos de I/O locales y las bases terminales. Esta comunicación puede ser a través de Ethernet de 10 a 100 Mb/s, o por puertos RS 232 y RS 485.
3. **Trabajar en Ambientes Pesados:** El Field Point puede operar en ambientes industriales, la gran mayoría de sus módulos pueden operar por encima del rango de -40°C a 70°C.

Los módulos que se utilizaron en el sistema para la adquisición de datos fueron:

1. NI FP-1000

Este módulo es el que permite la conexión directa al puerto serial del Computador, mediante comunicación RS 232. Este módulo maneja la comunicación entre el PC y los módulos de entradas y salidas, que registran las señales. Además también provee unas buenas características de auto configuración, fácil uso, instalación y mantenimiento.

Este módulo incluye un software para su configuración, lo cual simplifica e integra su funcionamiento e instalación.

El modulo NI FP-1000, se comunica a una rata máxima de 115.2 Kb/s; este módulo tiene puerto para comunicación RS 232 y RS 485. Este dispositivo es inteligente, pues indica si se presenta algún problema de comunicación entre la computadora y los módulos.



Figura 46. Modulo NI FP-1000

En este dispositivo se pueden observar 4 leds que indican su estado de la siguiente manera: El led de poder, indica el estado del banco, ON-OFF, según este. El led de red, indica la correcta conexión con el PC. El led de acceso, que indica el acceso de información de cualquier módulo al computador, o viceversa. El led de estado, que indica es estado después de realizar su auto comprobación.

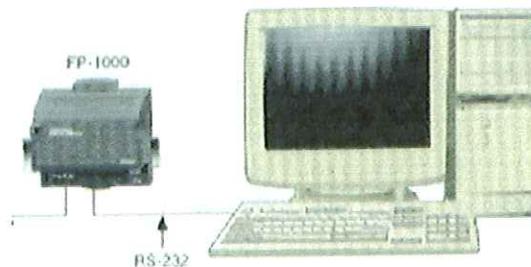


Figura 47. Comunicación entre el Modulo NI FP-1000 y el PC

El modulo FP NI-1000, se alimenta con una fuente de poder cuyo voltaje de salida este entre 11 y 30 Vdc; el mismo filtra y regula la señal de alimentación. Este modulo puede ser instalado en un riel estándar de 35mm.

2. FP TC-120

Este módulo es el modulo que se utiliza para la adquisición de las señales que envían las termocuplas tanto a la entrada como a la salida del intercambiador de calor. Este módulo tiene capacidad para 8 termocuplas o para 8 entradas de milivoltios.



Figura 48. Modulo FP TC-120

El modulo FP TC-120 tiene capacidad para 8 canales de entrada para la medición de señales de temperatura desde una termocupla, a demás se puede convertir en un modulo de 8 entras de señales en milivoltios. Este módulo filtra las señales de la termocupla removiendo de 50 a 60 Hz de ruido. De igual forma este provee una compensación de empalme frío.

Tiene como gran ventaja, que se puede configurar cada canal individualmente, para cualquier tipo de termocupla, o para la entrada en milivoltios. Cuenta con una muy alta precisión en la medición de la señal, tiene 16 bits de resolución con un voltaje estable de referencia y un circuito de calibración que digitaliza la señal de entrada.

Este módulo contiene un microcontrolador que compensa y linealiza la lectura de la termocupla por los estándares NIST-90, usando una rutina avanzada de linealización que asegura una máxima precisión.

El módulo de termocuplas, trabaja con la base terminal FP-TB-3, la cual es construida isotérmicamente, para minimizar los errores causados por el calor de fuentes cercanas o de módulos adyacentes; esto le asegura una máxima precisión.

El diagrama de conexión de este modulo es el siguiente:

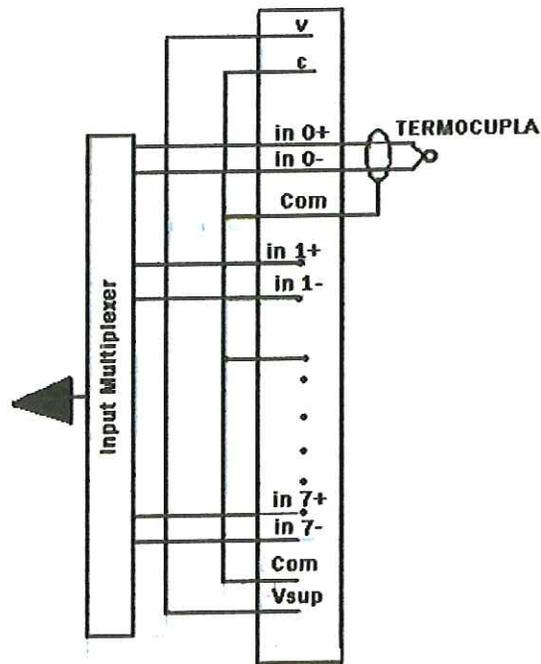


Figura 49. Diagrama de conexión del modulo FP TC-120

3. FP AO-200

Este es un modulo de salidas análogas, ya sea en corriente o en voltaje, y se utiliza, para enviar la señal de control a las dos válvulas.



Figura 50. Modulo FP-AO-200

El módulo FP-AO-200 tiene 8 canales para salidas de 0-20 mA o de 4 a 20 mA.

Este módulo incluye la detección de conexiones abiertas (corto-circuito), e incluye protección contra sobre corrientes. Este dispositivo viene con certificación NIST-TRACEABLE, de calibración que asegura exactitud y confiabilidad en las mediciones. Al igual que los módulos anteriores, este requiere una fuente de poder externa que le suministre 24 Vdc.

Cada canal de salida incluye un circuito de monitoreo, y un led que indica la detección de un circuito abierto. El FP-AO-200 también reporta condiciones de error al modulo NI FP-1000 y al software; errores como falta de alimentación, o algún problema con cualquier canal.

El diagrama de conexión de este modulo es el siguiente:

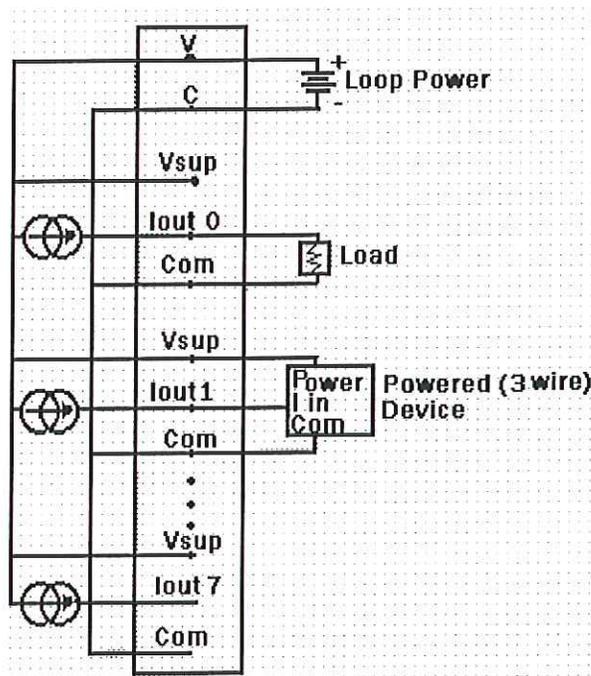


Figura 51. Diagrama de conexión del modulo FP AO-200

Este módulo se monta sobre una base terminal universal FP-TB-1 o FP-TB-2. Cada canal del módulo tiene tres terminales; el terminal de salida (Vout o Iout), el común (com) y el terminal de alimentación (Vsup). La alimentación externa, se debe conectar en los terminales V y C del modulo.

4. FP CTR-500

Este módulo contiene 8 canales contadores de pulso, de 16 bits (65536) cada uno, además tiene 4 compuertas de entrada y 4 salidas, que se pueden configurar para operar de diferente forma.

Este módulo es el que se utiliza en el sistema, para adquirir la señal del sensor de caudal, que envía una cantidad de pulsos, de acuerdo al caudal que pasa a través de él.



Figura 52. Módulo FP-CTR-500

Este módulo necesita una fuente de poder que le suministre de 10-30 Vdc. Cada canal del FP-CTR-500, se puede configurar para trabajar con una señal de sincronización externa (Vin) o con una señal interna, que su circuito genera, que va de 1 a 32 KHz.

Por otro lado, este tiene la opción de combinar cualquier canal contador con uno anterior a este, de tal forma que se genera un canal contador en cascada de 32 bits (4.294.967.296) o más grande.

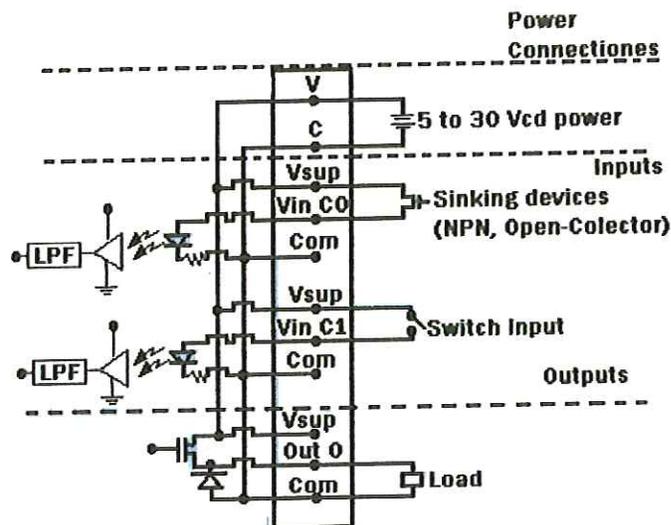


Figura 53. Diagrama de conexión del módulo FP CTR-500

El modulo FP-CTR-500 se debe montar en una base terminal universal, ya sea una FP-TB-1 o FP-TB-2; cada canal de salida tiene 3 terminales: una entrada o salida (Vin o Vout), la alimentación (Vsup) y el común.

5. BASES TERMINALES

Estas son una serie de bases terminales universales en las que se montan los módulos de entradas y salidas de los field Point, las cuales proveen al sistema de terminales convenientes de tornillo o resorte para la conexión de los alambres que conducen las señales.

Dentro del sistema se utilizan dos clases de bases terminales:

1. FP-TB 1

Este base es de propósito general, y trabajan o sirven para que cualquier modulo de entrada y salida sean instalados en ellas, exceptuando los módulos duales. Estas bases simplifican las conexiones y eliminan la necesidad de conectar más de un alambre al terminal.

2. FP-TB 3

Esta también conocida como la base isotérmica, es indispensable, para aplicaciones donde se utilizan termocuplas (módulo FP-TC-120).

La base FP-TB 3, usa una construcción isotérmica que disminuye el efecto de la unión o empalme frío, el cual puede causar error en la señal tomada, debido al gradiente de temperatura causado por fuentes externas de calor, o por módulos adjuntos a esta.

4.2 CALIBRACION DE LOS SENSORES

4.2.1 Calibración sensor de caudal

Para la utilización del sensor de caudal, se hace necesario, obtener la forma, por la cual, se pueda determinar la cantidad de agua que pasa por el medidor. Ya que este envía señales de pulsos, y estos deben ser traducidos a una medida de volumen por unidad de tiempo. Esto es lo que se busca en el experimento de calibración.

4.2.1.1 Diseño del experimento para la calibración

Para el experimento de calibración del sensor, se realizó el siguiente procedimiento:

- Se instaló el sensor, de acuerdo a las indicaciones establecidas.
- Se tomó un tanque del cual se conocía su capacidad, este se aforó, obteniéndose las siguientes medidas.

El tanque tiene las siguientes medidas:

- 5 Lts = 16 cm.
- 5,5 Lts = 17,5 cm.
- 6 Lts = 19 cm.
- 6,5 Lts = 20,5 cm.

- Se hizo pasar agua a través del sensor, y se descargó en el tanque aforado. Se realizaron las mediciones del tiempo que se demoraba en alcanzar el límite del tanque y la cantidad de pulsos que el sensor enviaba.
- Se tabularon los datos.
- Se determinó la ecuación resultante. En función de los pulsos enviados por el sensor.

Para obtener los resultados; se hizo necesario la conexión del sensor a través del conector, M1 2x1, con el que cuenta dicho sensor, dirigido hacia el módulo de field-point de contador de pulsos, este a su vez se conectó a través de RS 232, a la computadora. Una vez conectado al PC, y mediante un ambiente LabWindows se creó un código (programa) a través del cual se determina la cantidad de pulsos que el sensor marca.

Este es el código utilizado para la lectura de la señal del sensor de caudal (pulsos).

```
float Leercaudal (float setpoint)
{
    FP_Read (IAKhandle, timerCntHandle, readBuffer, 100, &timestamp);
    ms = *((int*) (readBuffer));
    ms1 = ms;
    ms = ms1-ms0;
    if (ms<0)
    {
        ms = (ms1+65535)-ms0;
    }
}
```

Tabla 6. Datos obtenidos en el proceso de calibración del sensor de caudal

PULSOS	TIEMPO (seg)	LONGITUD TANQUE	VOLUMEN (Lts)	APERTURA DE VALVULA	CAUDAL (Lts/seg)
		(cm)			
<i>PRUEBAS PARA APERTURA DEL 100% DE LA VALVULA</i>					
181-183	2.49	17.8	5.933	100%	
181-183	2.38	17.4	5.800	100%	
181-183	2.99	20.2	6.733	100%	
181-183	2.71	19.4	6.467	100%	
	2.64250		6.23325		2.35885
<i>PRUEBAS PARA APERTURA DEL 75% DE LA VALVULA</i>					
166-167	2.88	19.1	6.367	75%	
166-167	3.07	20.2	6.733	75%	
166-167	3.03	19.6	6.533	75%	
	2.99333		6.54433		2.18630
<i>PRUEBAS PARA APERTURA DEL 25% DE LA VALVULA</i>					
54	8.66	18.3	6.1	25%	
54	9.22	19.6	7	25%	
54	8.92	19	6	25%	
	8.93333		6.32200		0.70769
<i>PRUEBAS PARA APERTURA DEL 50% DE LA VALVULA</i>					
102-104	4.81	20.2	6.733	50%	
102-104	5.03	21.1	7.033	50%	
102-104	4.69	19.6	6.533	50%	
	4.84333		6.76633		1.39704

En la tabla 8, se muestra, el promedio de pulsos enviados por el sensor, el tiempo que se tarda en llenar el tanque, la altura que alcanza la cantidad de agua recolectada en el tanque, su respectiva traducción a litros, y el porcentaje de apertura de la válvula.

Se realizaron 4 pruebas, en las cuales se varia el porcentaje de apertura de la válvula, de tal forma que fue posible variar la cantidad de flujo que pasaba por el sensor, y poder contar con una serie de datos, de diferentes situaciones del sistema y obtener características de comportamiento en estos casos .

La ecuación se determinó tomando los datos de pulsos y tiempo, quienes a través de regresiones matemáticas, arrojaron el siguiente resultado .

$$CAUDAL = 0.033491105284 + 1.29028290784(10^{-2})X$$

Donde CAUDAL está dado en [Lts/seg.] y X está dado en pulsos.

4.2.2 Calibración de los sensores de temperatura

Este tipo de termocuplas, viene calibradas de fábrica, y certificadas por la misma. Cada termocupla es calibrada individualmente y se especifica su curva de temperatura. Estas son calibradas en el rango de temperaturas de 0 a 1260°C, y esta depende del número (grosor) del material, y de el tipo de termocupla que sea.

4.2.2.1 Diseño del experimento para la calibración

Primero se procedió a realizar la soldadura entre los extremos de las aleaciones (alambre), retorciéndolas y utilizando un soldador de arco, de tal forma que ningún otro material hace parte del sensor. Esta unión se enfundó, en un termoposo construido en bronce, y con las medidas requeridas para la instalación, de tal forma que logre una posición adecuada para la medición de la temperatura.

Por otro lado, se unieron los extremos libres de la termocupla a un cable especial apantallado que permite mantener la señal (éstas son las llamadas *uniones de referencia*) y que llevan la señal generada hasta el módulo de field-point de termocuplas (entradas análogas) que a su vez se conectó a la computadora. De esta manera, fue posible seguir la evolución de las mediciones a través de la pantalla del monitor.

El procedimiento que se siguió fue el siguiente:

1. Se tomó un reverbero, y se puso a calentar agua hasta el punto de ebullición.
2. Posteriormente, se realizaron mediciones tanto con la termocupla como con un termómetro análogo. Estos datos fueron tabulados.
3. Se cambió el agua, y nuevamente se puso a calentar, hasta alcanzar el mismo punto.
4. Luego de esto, se realizaron mediciones tanto con la termocupla sola, como con la unión de referencia que se le instaló.

- Proceso de calibración de las termocuplas

Para el proceso de calibración se realizaron 2 grandes pruebas, de la siguiente manera:

Prueba 1: muestras de la medición de la termocupla y del termómetro análogo. Con esta prueba, se pudo comparar el comportamiento de las termocuplas, con respecto al termómetro análogo de referencia.

Tabla 7. Datos de calibración de las termocuplas, prueba 1
Muestra 1

TIEMPO	TERMOCUPLA	TERMOMETRO
1 min.	95,17	95
1 min.	95,28	95
1 min.	95,19	95
1 min.	94,75	95
1 min.	95,16	95
1 min.	94,45	95
1 min.	95,17	95
1 min.	94,45	95
1 min.	94,52	95

Muestra 2

TIEMPO	TERMOCUPLA	TERMOMETRO
1 min.	94,42	95
1 min.	95,29	95
1 min.	94,92	95
1 min.	95,11	95
1 min.	94,52	95
1 min.	94,49	95
1 min.	94,96	95
1 min.	94,89	95
1 min.	94,33	95

En la prueba 1, mediante la cual se quería determinar, el error que presentaba la termocupla, se obtuvieron las siguientes graficas:

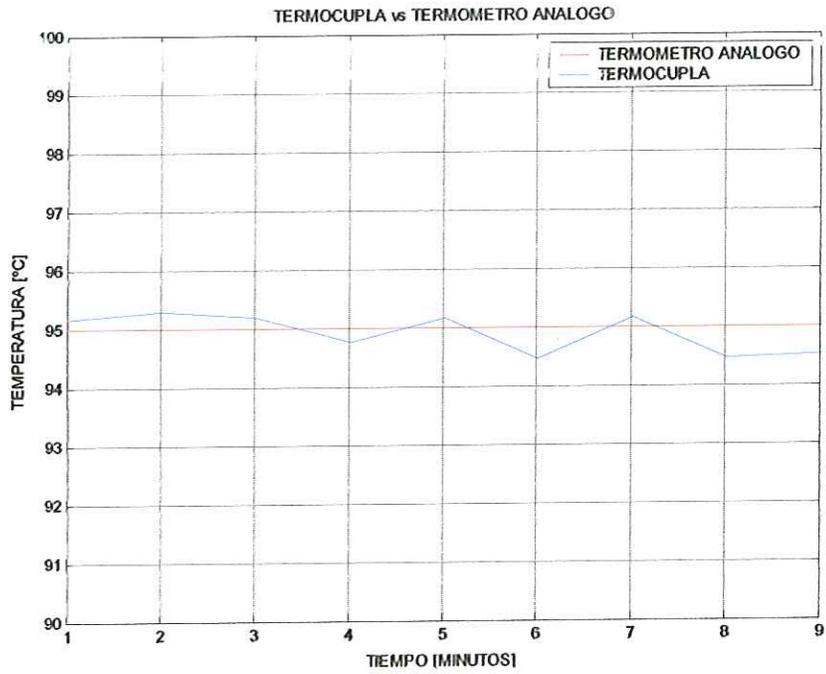


Figura 54. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 1 – muestra 1

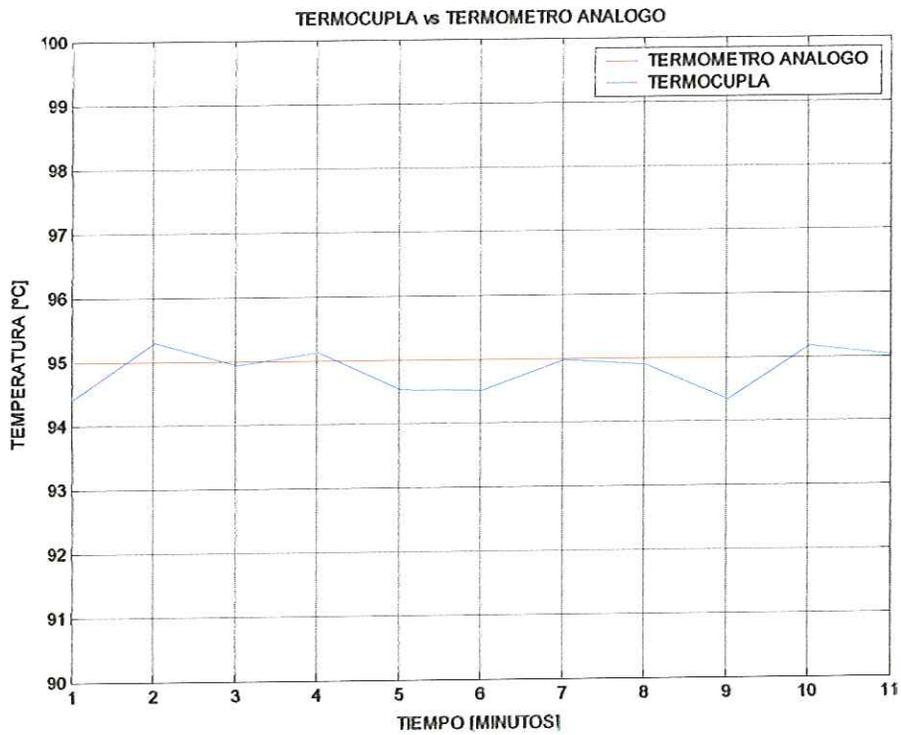


Figura 55. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 1 – muestra 2

Análisis de resultados

A través de estas gráficas podemos determinar que el termopar que se utiliza para la medición de las diferentes temperaturas del sistema, toma valores ubicados en el mismo rango del sensor análogo que utilizamos como referencia.

A pesar de que las diferentes mediciones realizadas, no son exactamente iguales, se debe entender la dificultad que presenta el determinar con precisión los decimales de la temperatura marcada por dicho termómetro, debido a que no es de fácil percepción para el ojo humano.

Es por esto que se decidió no realizar ninguna corrección por software, ni de acondicionamiento de señal a los termopares, pues las temperaturas que las pruebas arrojaron, son muy parecidas tanto a las que se obtuvieron con el termómetro, como con el valor de ebullición que presenta el agua en la ciudad de Bucaramanga y que es del 95.4 °C .

Prueba 2: muestras de la medición de la termocupla sola y de la termocupla con la unión de referencia. Con esta prueba, se pretende determinar la diferencia existente entre la señal enviada por la termocupla sola, y la señal enviada por la termocupla con extensión.

Tabla 8. Datos de calibración de las termocuplas, prueba 2

Muestra 1

TIEMPO	CABLE SOLO	UNION
1 min.	96,41	95,78
1 min.	96,44	95,63
1 min.	96,44	95,78
1 min.	96,44	95,57
1 min.	96,38	95,38
1 min.	96,47	95,35
1 min.	96,44	95,69
1 min.	96,53	95,5
1 min.	96,56	95,57
1 min.	96,53	95,72

En la muestra 1, se puede observar, que la temperatura del cable solo, es un poco mas alta que la temperatura sensada por la union, presentando un error no mayor al 1%.

Muestra 2

TIEMPO	CABLE SOLO	UNION
1 min.	96,28	95,75
1 min.	96,63	95,44
1 min.	96,72	95,1
1 min.	96,44	95,73
1 min.	96,53	95,7
1 min.	96,59	95,54
1 min.	96,53	95,35
1 min.	96,69	95,63
1 min.	96,81	95,75
1 min.	96,81	96,84

Muestra 3

TIEMPO	CABLE SOLO	UNION
1 min.	96,53	96,69
1 min.	96,59	96,81
1 min.	96,63	96,15
1 min.	96,75	96,22
1 min.	96,59	96,25
1 min.	96,75	96,22
1 min.	96,84	96,22

Análisis de Resultados

En la segunda prueba, de la cual se tomaron 3 muestras con diferentes recipientes de agua, y cuya medición se hizo en un intervalo de 1 minuto, se obtuvieron las siguientes graficas.

Por medio de la grafica siguiente, se puede observar que el comportamiento de la termocupla con extensión, es muy similar al comportamiento de la termocupla sola, a pesar de que las mediciones demuestran que con la extensión se baja menos de un grado el nivel promedio de las mediciones.

En la grafica posterior se puede observar de igual forma la similitud en el comportamiento de las mediciones de los sensores.

Es por esto que se tomó la decisión de dejar a un lado, el concepto teórico, que explica que al realizar una unión en el otro extremo de la termocupla se estará formando una nueva termocupla, con la cual se afecta la lectura real del sistema.

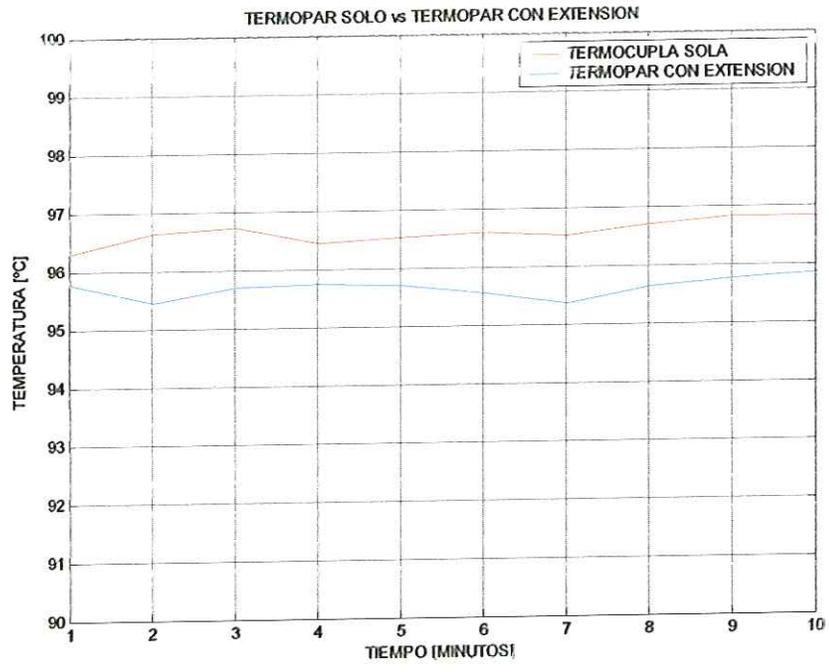


Figura 56. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 2 – muestra 2

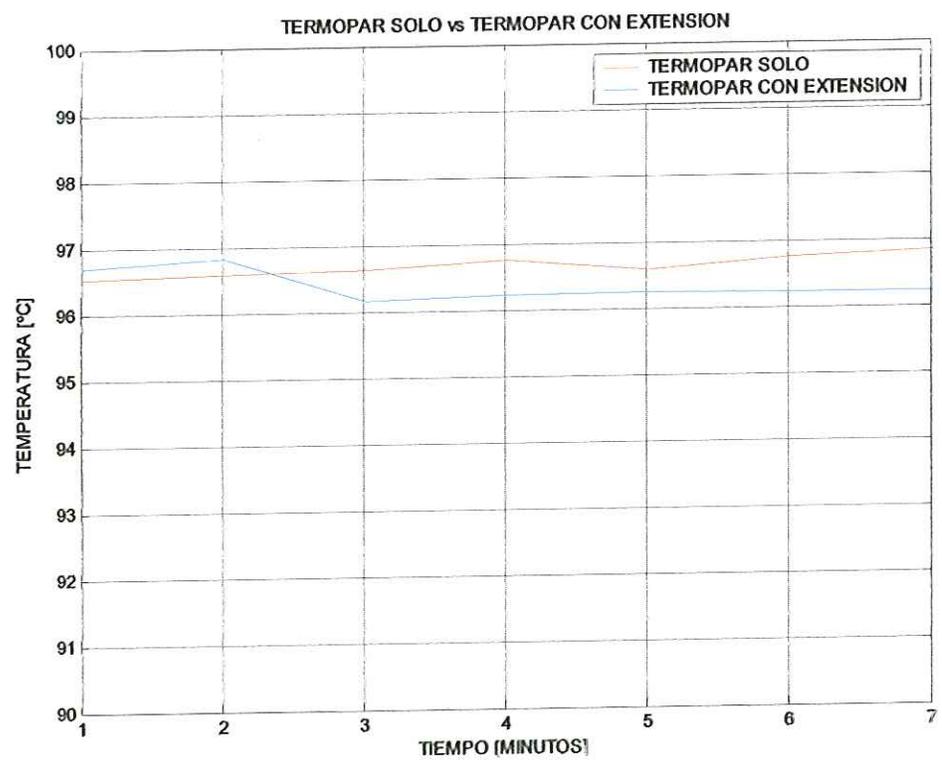


Figura 57. Calibración de las termocuplas, grafica prueba 2 – muestra 3

En los datos observamos que ciertamente, la lectura del termopar con unión de referencia, disminuye un poco la lectura real en comparación a la lectura del termopar solo, pero esa disminución no es mayor a un grado centígrado, razón por la cual decidimos utilizar este método, para poder llevar la señal hasta los field point sin afectar sustancialmente la lectura y con un bajo costo.

4.3 INSTALACION DE ELEMENTOS Y COSTRUCCION DEL SISTEMA

El sistema se dividió en dos partes; el montaje mecánico y el montaje eléctrico y electrónico.

- **Montaje mecánico:** Dentro del montaje mecánico se contempla, la instalación de las válvulas de control, la instalación de los sensores de temperatura y caudal, y todas aquellas modificaciones, cambios e instalación de accesorios, necesarios para la adecuación del sistema y que se realizaron sobre la sección de generación térmica ubicada en la plata piloto de la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

Básicamente, el sistema, en la sección de transporte de agua fría, toma el agua de uno de los tanques de almacenamiento, y a través de una bomba ubicada allí, el agua es dirigida hacia el intercambiador de calor; en su recorrido, el agua, encuentra la válvula de control de caudal, quien es la encargada de ejecutar, la respuesta del controlador, de acuerdo a la consigna de caudal que se halla seleccionado. Posteriormente de la válvula de control, se encuentra el sensor de caudal, el cual verifica, si la cantidad de agua que va hacia el intercambiador, sea igual a la de consigna.

Una vez, el agua pasa por el intercambiador, esta puede ser dirigida hacia un segundo intercambiado de calor y posteriormente enviada al desagüe, o si bien se prefiere, es nuevamente, enviada al tanque de almacenamiento. Todo lo descrito anteriormente, conexiones, cantidad y tipo de válvulas instaladas, tamaño de la tubería entre otras cosas, se puede observar de una forma más detallada y clara, en el diagrama de proceso adjunto.

Por otro lado, en la sección de transporte de vapor, éste es generado, mediante la caldera, y transportado hacia el intercambiador de calor. La válvula de control del flujo másico del vapor esta ubicada antes de la entrada del mismo, lo cual permite manipular la cantidad de vapor que entra a este y nos permite controlar la temperatura del agua de salida.

- **Montaje eléctrico y electrónico:** El montaje eléctrico y electrónico del sistema, se concentra, básicamente en la caja de control y en la caja de potencia. La caja de control es el punto donde llegan todas las señales de los sensores antes de pasar a los field Point, y las señales de control enviadas por los mismos, hacia las válvulas. Por su parte la caja de potencia, es donde se encuentra la alimentación de las dos válvulas de control. Estas están ubicadas a un costado de uno de los intercambiadores de calor.

Por otro lado se encuentra el banco, donde se encuentran los módulos de field Point y el computador, donde está instalado el software de control o controlador.

- Componentes de la caja de control: Dentro de la caja de control se encuentran 8 borneras, de donde se pueden sacar las señales hacia el banco móvil de los field Point; su configuración es la siguiente:

- Bornera 1 Tierra. (Com) (NI-FP-1000).
- Bornera 2 Caudalimetro (Vin) (NI-FP-CTR-500).
- Bornera 3 Caudalimetro (Vsup) (NI-FP-CTR-500).
- Bornera 4 Caudalimetro (Com) (NI-FP-CTR-500).
- Bornera 5 Válvula de agua (Feedback) (NI-FP-AO-200).
- Bornera 6 Válvula de agua (Señal de control) PIN 1 (NI-FP-AO-200).
- Bornera 7 Válvula de vapor (Feedback) (NI-FP-AO-200).
- Bornera 8 Válvula de vapor (Señal de control) PIN 3 (NI-FP-AO-200).

A demás de estas borneras, dentro de la caja de control se encuentran los 4 cables de las termocuplas, las cuales deben ser conectadas directamente al modulo FP-TC-120 del field Point, sin la utilización de ningún otro tipo de extensión. Estos cables están marcados y distribuidos de la siguiente manera:

- Termocupla 1 Temp. de salida intercambiador de cascos y tubos.
- Termocupla 2 Temp. de salida del intercambiador de tubos concéntricos.
- Termocupla 3 Temp. de entrada intercambiador de cascos y tubos.
- Termocupla 4 Temp. de entrada del intercambiador de tubos concéntricos.

- Componentes de la caja de Potencia: Dentro de la caja de potencia se encuentra:

- 2 Transformadores de 24 voltios DC.
- 2 Fusibles de 1 Amperio.
- 2 Interruptores.

Los transformadores son los encargados de suministrar el voltaje de alimentación al as válvulas de control; estos a su vez, son alimentados a través de unos cables de tensión de 110 voltios, que llegan a la caja de control.

Los fusibles, son fusibles de 1 amperio, intercambiables, que se pusieron para evitar alguna sobre corriente, que pueda afectar el estado de las válvulas de control. Cabe resaltar que todo lo descrito anteriormente, se encuentra especificado en el diagrama eléctrico adjunto.

5. SOFTWARE DE CONTROL

El software de control que se diseñó, consta de dos secciones, el programa de control difuso, y el programa del control PID. Estos controladores están elaborados en ambiente Labwindows/CVI, un software de la compañía National Instruments, el cual permite realizar las operaciones pertinentes con los datos capturados a través de los módulos de field Point, y que son utilizados en el control del sistema.

5.1 LABWINDOWS / CVI

LABWINDOS/CVI es un completo ambiente ANCI C desarrollo para crear aplicaciones de instrumentos virtuales basados en GPIB, PXI, VXI, tarjetas de adquisición de datos, Field Point entre otros. El contiene las librerías incorporadas, para la adquisición, análisis, control y visualización de señales; además trae un editor de interfase grafica, en la cual el usuario puede construir sus aplicaciones de una forma rápida, simple y sencilla. LABWINDOS/CVI también realiza la generación automática del código, con lo cual usted puede interactuar y modificar el mismo, antes de agregarlo a su proyecto.

LABWINDOS/CVI, permite crear interfaces graficas localizadas, crear y trabajar con componentes ActiveX, y desarrollar múltiples aplicaciones de medición y automatización, poderosas y fáciles de manejar en un solo programa. LABWINDOS/CVI combina un ambiente interactivo, flexible, de fácil uso, y con compiladores en código ANSI C.

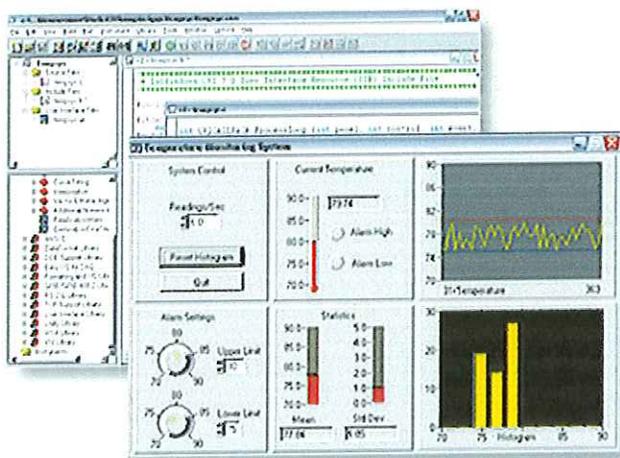


Figura 58. Ventanas de LabWindows/CVI

Para crear una aplicación en LABWINDOS/CVI, primero debe empezar por la interfase grafica. En esta interfase, usted puede seleccionar los controles a utilizar en el diseño específico de su aplicación, además podrá, modificar la apariencia y la función de estos controles de acuerdo a su necesidad. Una vez diseñada esta interfase, se genera automáticamente el código fuente en lenguaje C, que responde a los controles de la interfase grafica.

Para completar la aplicación debe seleccionar las librerías para la medición, tales como las que permiten la integración del hardware que se esta utilizando, y las de análisis de señales, e integrarlas al código generado anteriormente, esto se realiza a través de los function Panels, los cuales se convierten en una vía grafica para insertar los parámetros y valores necesarios. Además de esto, LABWINDOS/CVI, cuenta con una ventana que le indica e identifica los errores presentes en el código.

En el momento que se eligió trabajar con LabWindows/CVI, se presentaron muchos inconvenientes, por lo nuevo que este software era para nosotros, dentro de los inconvenientes podemos citar: pero a medida que se iban realizando tareas pequeñas, que al final fusionadas, formarían lo que sería el programa de control del proyecto, este software se fue convirtiendo en una aplicación cómoda de utilizar, hasta llegar al punto de convertirse en algo familiar, y lo que alguna vez llego a ser inexplorado, paso a ser nuestra herramienta cotidiana de trabajo.

Es muy importante hablar de los inconvenientes que se presentaron con el software, los cuales fueron citados en el párrafo anterior, pero también es de vital importancia hablar de las facilidades que se tuvieron al trabajar con dicha herramienta, pero hablar de facilidades es algo muy relativo, ya que estas se presentaron desde el momento que esta aplicación se convirtió en algo conocido para nosotros, es decir, después del tiempo de trabajo que se le dedico a este programa computacional.

5.2 SOFTWARE DE CONTROL DIFUSO

El programa de control difuso, es el encargado de tomar los datos de los sensores, tanto de temperatura, para el caso del control de temperatura, como del sensor de caudal, para el control del mismo, procesarlos, y de acuerdo a una consigna establecida, determinar una respuesta, la cual es enviada a los actuadores. Básicamente este programa se encarga, de dibujar los conjuntos difusos, de acuerdo a lo establecido por el usuario, se encarga de fuzzificar las entradas, hacer la inferencia de estas entradas en las reglas, realizar la agregación en los conjuntos de salida, y ejecutar el proceso de defuzzificación, para determinar la respuesta que ayude al sistema a conseguir su estado estable.

Es importante destacar, que el software, no permite aumentar la cantidad de conjuntos para las variables de entrada y salida, al igual que no permite

modificar las reglas ya establecidas, pero por el contrario, provee la opción de determinar las dimensiones de los conjuntos de todas las variables, permite modificar, la consigna del control, escoger el método de defuzzificación que se desee (de los establecidos), y permite, realizar un control adecuado y eficaz, sobre la temperatura de salida del intercambiador de calor y sobre la cantidad de agua que ingresa a este.

5.2.1 DIAGRAMA DE FLUJO

En el diagrama de flujo que se muestra, se puede observar claramente el modo de operar del software, este realiza un control difuso de temperatura y de caudal, pero de una forma independiente. A continuación se explicara más a fondo el funcionamiento y finalidad de cada una de las partes descritas.

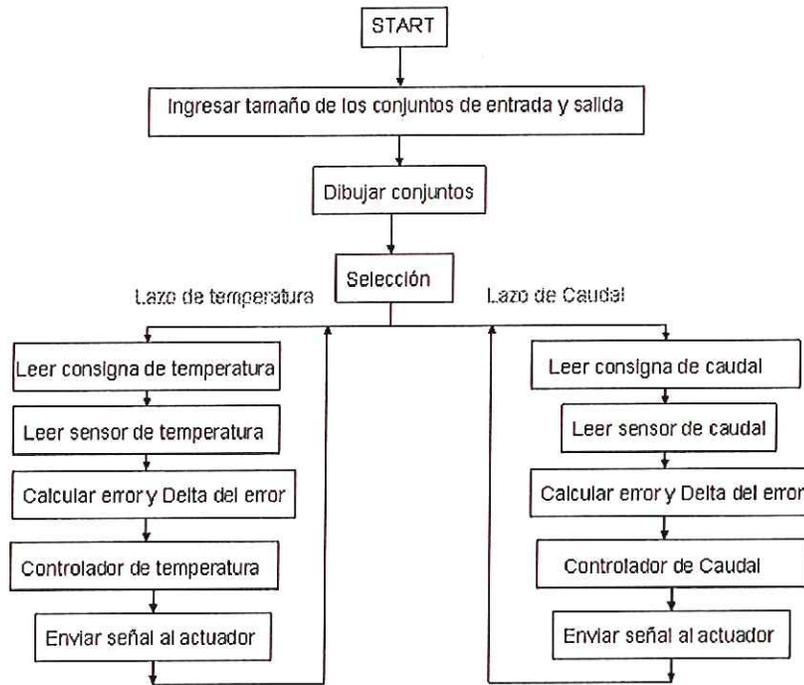


Figura 59. Diagrama de Flujo del software de control difuso

5.2.2 CARACTERISTICAS

El software, consta principalmente de 3 paneles independientes en donde el usuario puede interactuar con el sistema. El primer panel o panel de entrada que es en donde se definen las dimensiones de los conjuntos difusos.

Se puede observar que el permite al usuario determinar los valores de los conjuntos positivo, zero y negativo, de las variables de entrada (Error y Δ Error), y cerrar, no operar y abrir de la variable de salida (Corriente mA), tanto para el caudal como para la temperatura. Además muestra, en la parte inferior la configuración de los módulos de Field Point, que permite la adquisición de las señales de los sensores, y el envío de la señal a las válvulas de control.

El botón Start, permite cargar las librerías, y los buffer necesarios, para realizar la comunicación con los Field Point en el momento que se requiera. El botón Graficar, es el que el usuario debe oprimir, una vez, tenga escrito todas las dimensiones de los conjuntos para poder pasar al siguiente panel. Por su parte el botón Quit, termina el programa.

IAK Path	RESOURCE_NAME	device name	device_name2	device name3	ITEM NAME CORRIENTE
	FP Res	FP.TC-120@1	FP.AD-200@2	FP.CTR-500@3	AI

Figura 60. Panel de entrada del software del control difuso

El panel numero dos o panel de graficar, es en el cual el usuario, puede observar los conjuntos dibujados, y puede verificar la respuesta de la fuzzificación en las entradas del sistema, y el conjunto resultante de la agregación y la respuesta de la defuzzificación en la variable de salida. En otras palabras, en este panel se observa sobre que conjuntos difusos recaen las variables de entrada, y su grado de pertenencia, el conjunto resultante de la agregación de la inferencia de las reglas, y el valor resultante del controlador.

En este panel, el botón Graficar conjuntos, es el que dibuja los conjuntos según se hallan escogido en el panel anterior, el control Panel de Salida, carga el panel final y el Quit, es el control que elimina el panel.

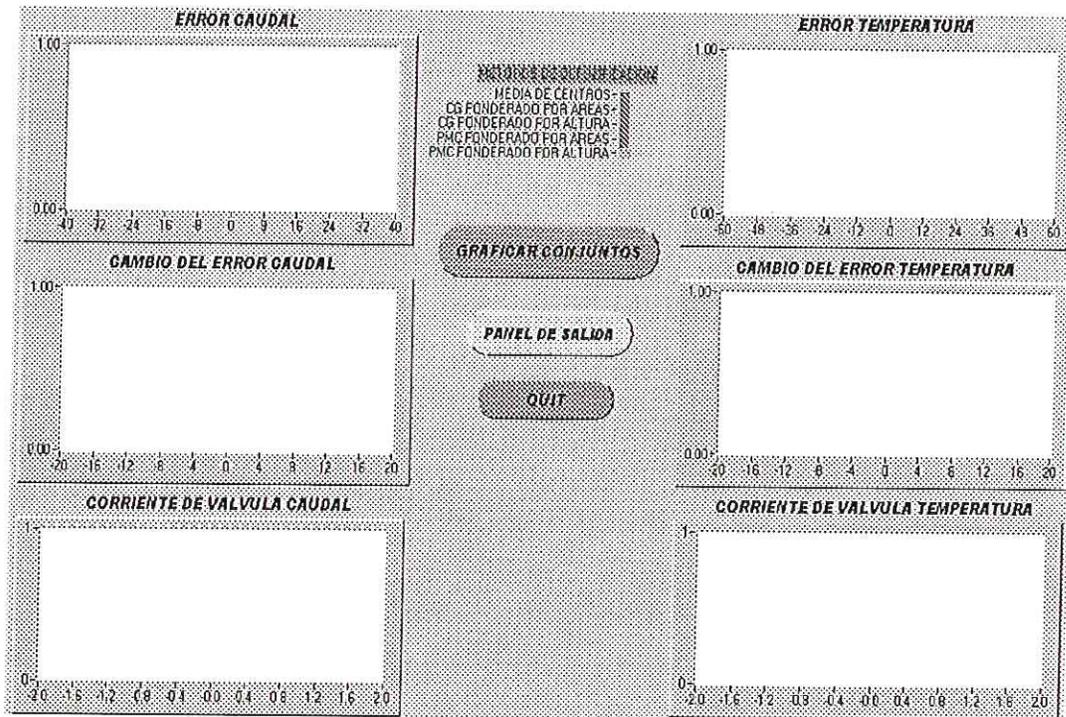


Figura 61. Panel de graficar del software del control difuso

El tercer Panel, es el panel de salida, y es donde se puede observar el comportamiento de las variables a controlar, a través de las graficas que se observan, y donde se muestran los valores de las variables, error, delta del error, respuesta de la defuzzificación y la salida del controlador (mA) tanto en el control de temperatura, como en el control de caudal.

De igual forma, en este panel el usuario, puede determinar el valor de consigna, puede escoger mediante dos interruptores, el control que desea realizar, es decir, caudal o temperatura, puede seleccionar de tal modo que los dos controles se ejecuten simultáneamente.

Además también tiene la referencia de la temperatura de entrada del agua al intercambiador, y tiene la posibilidad de modificar el control Rate ó rata de control, que es la variable que determina la frecuencia (en segundos) en la cual se ejecute la rutina de control propiamente.

Al igual que en los paneles anteriores, este tiene un control llamado Quit, mediante el cual se puede interrumpir la rutina del control, y deshabilitar el panel.

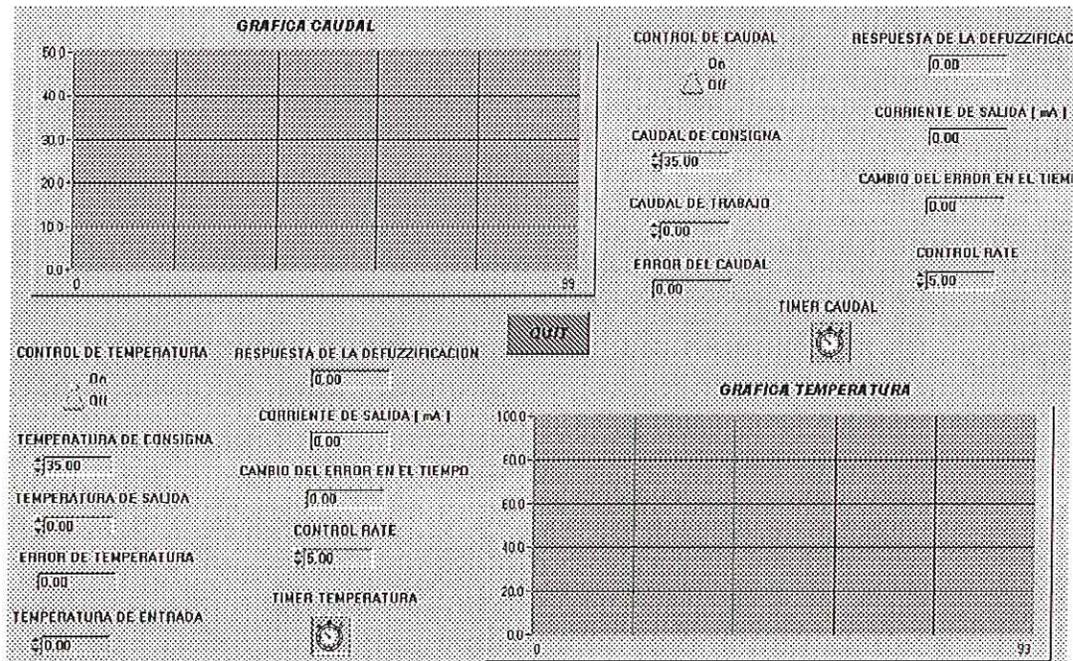


Figura 62. Panel de salida del software del control difuso

Por otro lado el software, también tiene 3 funciones indispensables mediante las cuales se realizan la adquisición de los datos, y se envía la señal a las válvulas, estas son las siguientes:

- Función leer caudal

```
float Leercaudal (float setpoint)
{
    FP_Read (IAKhandle, timerCntHandle, readBuffer, 100, &timestamp);
    ms = *((int*)(readBuffer));
    ms1 = ms;
    ms = ms1-ms0;
    if (ms<0)
    {
        ms=(ms1+65535)-ms0;
    }
    ms = ms/controlRate;
    ms0= ms1;
    ls = ((ms*(1.29028*pow(10,-2)))+0.03349)*60;
    fprintf(datos," CAUDAL = %.1f \n",ls);
    SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CAUDAL_DE_TRABAJO_2, ls);
    if (n>2)
    {
        PlotStripChartPoint (panelSal, PANEL_SAL_GRAF_CAUDAL, ls);
    }
    error = ls - setpoint;
    SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_ERROR_CAUDAL, error);
    return (error);
}
```

Esta función es la encargada de abrir el buffer, determinar el valor de pulsos, enviados por el sensor de caudal y adquirido por el módulo contador de los field Point, restarlos con los pulsos anteriores, para así determinar la cantidad de pulsos enviados en ese instante de tiempo, posteriormente, aplicar la ecuación

correspondiente al valor del caudal en litros por minuto, graficarlo, y guardar el dato de un archivo adjunto, calcular el error, graficarlo y mostrarlo en el panel de salida. Por otro lado, esta función también es la encargada de corregir el dato generado, en el momento que el contador de 16 bits (65535), llegue a cero nuevamente, y de esta forma no tener inconsistencias en el cálculo del caudal.

- Función leer temperatura

```
float LeerTemper (float setpointemper)
{
  for (i=0; i<2; i++)
  {
    FP_Read (IAKhandle, IOhandle[i], currentTemp, 100, &sysTime);
    value = *((float*)(currentTemp));
    if (i==1)
    {
      SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_TEMP_DE_SALIDA, value);
      PlotStripChartPoint (panelSal, PANEL_SAL_GRAF_TEMP, value);
      fprintf(datosres, " temperatura = %f \n ", value);
      errortemper = value - setpointemper;
      SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_ERROR_TEMP, errortemper);
    }
    else
    {
      SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_TEMP_DE_ENTRADA, value);
    }
  }
  return (errortemper);
}
```

La función leer temperatura, se encarga de abrir el buffer, leer la señal adquirida por el módulo de termocuplas, tanto para la entrada como para la salida del intercambiador de calor, graficar este dato en el panel de salida y crear un archivo adjunto con los datos de temperatura durante todo el control. De igual forma, este calcula el error.

- Función escribir corriente

```
void Escribircorriente (float temp)
{
  defuzificadocero=temp;
  temp=temp*pow(10,-3);
  memcpy (valu, &temp, 4);
  FP_Write (IAKhandle, IOpointHandle, valu, BUFFER_SIZE);
  temp=temp/pow(10,-3);
  fprintf(datosdos, " corriente = %f \n ", temp);
  bandera=temporal;
  bandera=bandera/pow(10,-3);
  SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CORRIENTE, temp);
  SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CORRIENTE_TEMP, bandera);
}
```

Por su parte esta función es la misma, para la señal que va hacia la válvula de control de agua, como para la válvula de control del vapor. La función escribir corriente, se encarga de recibir la respuesta del controlador, convertir esta respuesta a los niveles de corriente aceptada por la válvula, abrir el buffer y a través del módulo de salidas análogas, enviar la señal. De igual forma, esta función crea un archivo adjunto en donde se lleva el record de la corriente suministrada a las válvulas de control.

El software de control difuso se complementa con las funciones que realiza el controlador difuso.

5.3 SOFTWARE DE CONTROL CLASICO (PID)

El programa del control PID, es el encargado de tomar los datos de los sensores, tanto de temperatura, para el caso del control de temperatura, como del sensor de caudal, para el control del mismo, procesarlos, y de acuerdo a una consigna establecida, determinar una respuesta, la cual es enviada a los actuadores. Básicamente este programa se encarga, de ejecutar las tres acciones de control, proporcional, derivativa e integral para determinar la respuesta que ayude al sistema a conseguir su estado de consigna.

Es importante destacar, que el software, permite la opción de determinar las constantes de las acciones de control, permite de igual forma establecer la consigna, el control Rate o rata de control y permite visualizar el comportamiento de la variable a controlar.

5.3.1 DIAGRAMA DE FLUJO

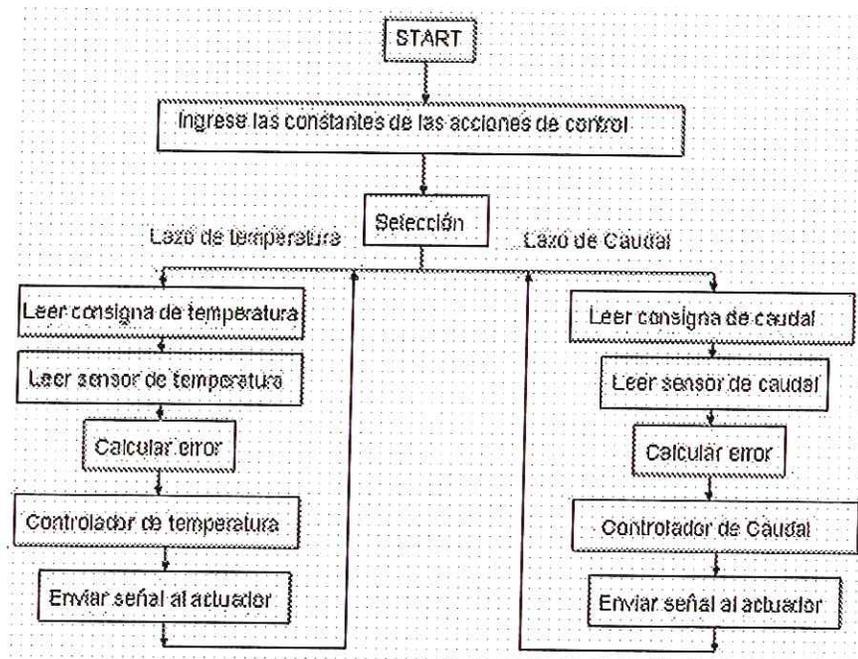


Figura 63. Diagrama de Flujo del software de control PID

El diagrama de flujo del software PID, es muy parecido al diagrama de flujo del software de control difuso, en lo único que difieren es en la parte de determinar y graficar los conjuntos, pero tiene el mismo esquema en los dos lazos de

control; claro teniendo en cuenta que en el controlador también existe una gran diferencia.

5.3.2 CARACTERISTICAS

El software del control PID, consta de un único panel, en el cual se puede visualizar todas las variables que este programa maneja. En el se puede identificar fácilmente, las constantes de las acciones de control, tanto para el control de temperatura como para el control de caudal, al igual se puede modificar y observar el valor de consigna, la variable de la rata de control, la configuración de los módulos de field Point que se manejan en el sistema, y los valores de temperatura a la entrada y salida del intercambiador, el valor del caudal, y las respuesta de los controladores en mA.

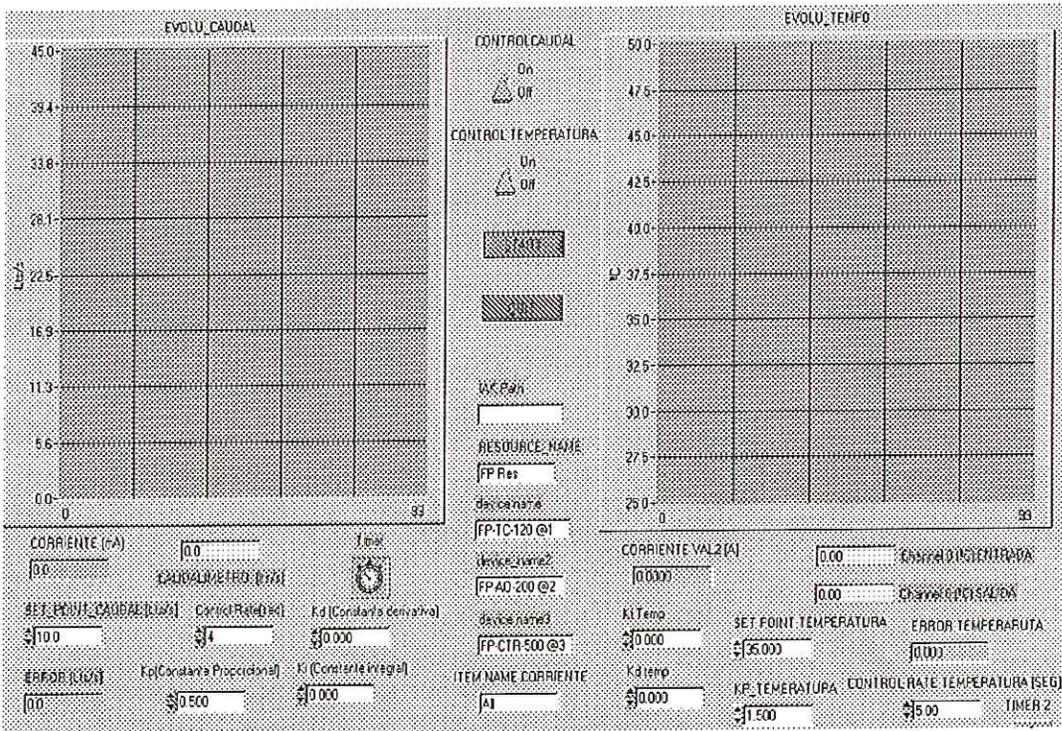


Figura 64. Panel del control PID

Este panel tiene dos controles, un Start y un Quit, mediante los cuales el usuario puede cargar la configuración de los field Point, y abrir el buffer para la adquisición de los datos, o interrumpir el programa una vez realizado el control.

Por otro lado también cuenta con dos interruptores, uno de caudal y otro de temperatura con los cuales se puede escoger el control que desea realizar, o si bien lo prefiere, también puede ejecutar los dos al mismo tiempo. Se puede de igual forma observar el comportamiento de las variables a controlar a través del tiempo, para establecer la respuesta del controlador.

Al igual que el software de control difuso, este también tiene 3 funciones indispensables mediante las cuales se realizan la adquisición de los datos, y se envía la señal a las válvulas, estas son las siguientes:

- Función leer caudal

Esta función es la encargada de abrir el buffer, determinar el valor de pulsos, enviados por el sensor de caudal y adquirido por el módulo contador de los field Point, restarlos con los pulsos anteriores, para así determinar la cantidad de pulsos enviados en ese instante de tiempo, posteriormente, aplicar la ecuación correspondiente al valor del caudal en litros por minuto, graficarlo, y guardar el dato en un archivo adjunto, calcular el error, y mostrarlo en el panel de salida.

Por otro lado, esta función también es la encargada de corregir el dato generado, en el momento que el contador de 16 bits (65535), llegue a cero nuevamente, y de esta forma no tener inconsistencias en el cálculo del caudal.

```
float Leercaudal (float setpoint)
{
    FP_Read (IAKhandle, timerCntHandle, readBuffer, 100, &timestamp);
    ms = *((int*) (readBuffer));
    ms1 = ms;
    ms = ms1-ms0;
    if (ms<0)
    {
        ms = (ms1+65535)-ms0;
    }
    ms = ms/controlRate;
    ms0= ms1;
    ls = ((ms*(1.29028*pow (10,-2))) +0.03349)*60;
    fprintf(datos, " CAUDAL = %.1f \n ", ls);
    SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_NUME, ls);
    if (n>2)
    {
        PlotStripChartPoint (panelHandle, PANEL_EVOLU_CAUDAL, ls);
    }
    error = ls - setpoint;
    SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_ERROR, error);
    return (error);
}
```

- Función escribir corriente

Esta función es la misma, para la señal que va hacia la válvula de control de agua, como para la válvula de control del vapor.

Esta función se encarga de recibir la respuesta del controlador PID, convertir esta respuesta a los niveles de corriente aceptada por la válvula, abrir el buffer y a través del módulo de salidas análogas, enviar la señal.

De igual forma, esta función crea un archivo adjunto en donde se lleva el record de la corriente suministrada a las válvulas de control.

El software de control PID se complementa con las funciones que realiza el controlador, el cual se explicaran sección controlador PID de este trabajo.

```

void Escribircorriente (float temp)
{
    defuzificadocero=temp;
    temp=temp*pow(10,-3);
    memcpy (valu, &temp, 4);
    FP_Write (IAKhandle, IOPointHandle, valu, BUFFER_SIZE);
    temp=temp/pow(10,-3);
    fprintf(datosdos," corriente = %f \n ",temp);
    bandera=temporal;
    bandera=bandera/pow(10,-3);
    SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CORRIENTE, temp);
    SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CORRIENTE_VAL2, bandera);
}

```

- Función leer temperatura

La función leer temperatura, se encarga de abrir el buffer, leer la señal adquirida por el módulo de termocuplas, tanto para la entrada como para la salida del intercambiador de calor, graficar este dato y crear un archivo adjunto con los datos de temperatura durante todo el control. De igual forma, este calcula el error.

```

float LeerTemper (float setpointemper)
{
    for (i=0; i<2; i++)
    {
        FP_Read (IAKhandle, IOhandle[i], currentTemp, 100, &sysTime);
        value = *((float*) (currentTemp));
        if (i==1)
        {
            SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_NUMERIC1, value);
            PlotStripChartPoint (panelHandle, PANEL_EVOLU_TEMPO, value);
            fprintf(datosstres," temperatura = %f \n ",value);
            errortemper = value - setpointemper;
            SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_ERROR_TEMPER, errortemper);
        }
        else
        {
            SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_NUMERICO, value);
        }
    }
    return (errortemper);
}

```

6. CONTROLADOR CLÁSICO

La estructura de un controlador PID es simple, aunque su simpleza es también su debilidad, dado que limita el rango de plantas donde pueden controlar en forma satisfactoria (existe un grupo de plantas inestables que no pueden ser estabilizadas con ningún miembro de la familia PID). La acción proporcional, da al controlador una salida proporcional al error, por su parte la acción integral, da una salida al controlador proporcional al error acumulado y la acción derivativa tiene carácter de previsión, lo que hace más rápida la acción de control, aunque esta última, tiene la desventaja de amplificar las señales de ruido y puede provocar saturación en la planta.

6.1 SISTEMA DE CONTROL

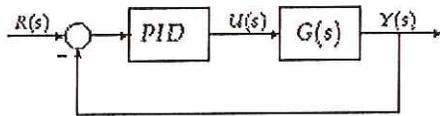


Figura 65 Sistema de control PID en lazo cerrado

Donde $R(s)$, es la señal de consigna o setpoint, $U(s)$, es la salida del controlador PID que va hacia la planta $G(s)$, y $Y(s)$, es el valor tomado de la variable a controlar, la cual se resta a la referencia y se determina el error (entrada del controlador),

Control de temperatura

El control de Temperatura, tendrá como objetivo conseguir que el agua que sale del intercambiador de calor logre el valor de la temperatura de consigna y luego mantenerla en ese valor aún ante perturbaciones externas. Es decir, deberá actuar sobre la válvula de control quien es la que suministra la cantidad de vapor que calienta el agua. La entrada a este sistema de control, será el error de temperatura, obtenido desde el termopar colocado a la salida del intercambiador, y la salida controlará la cantidad de corriente necesaria para abrir o cerrar la válvula proporcional (Planta). Este control es realizado a través de un controlador PID.

Control de Caudal

El control de caudal, tiene como objetivo conseguir que el flujo másico de agua que entra al intercambiador de calor, logre el valor de consigna, y pueda mantenerlo durante su operación, y ante perturbaciones. Esto quiere decir que deberá actuar sobre la válvula de control quien es la que estrangula la cantidad de agua que ingresa al sistema. La entrada del sistema, será el error obtenido

a través del sensor de caudal instalado a la entrada del sistema, y el controlador PID controlará la cantidad de corriente necesaria para manipular la válvula proporcional.

Ambos procesos comienzan, calculando la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura deseada, o del caudal medido y el caudal deseado. De esta manera conocemos el Error. Luego, se toman los valores de los parámetros de control, y se calcula la salida que va hacia la planta. Esta salida, obtendrá valores desde 0 a 20 mA, quienes representarán ángulos de apertura de la válvula proporcional.

6.2 ALGORITMO DE CONTROL

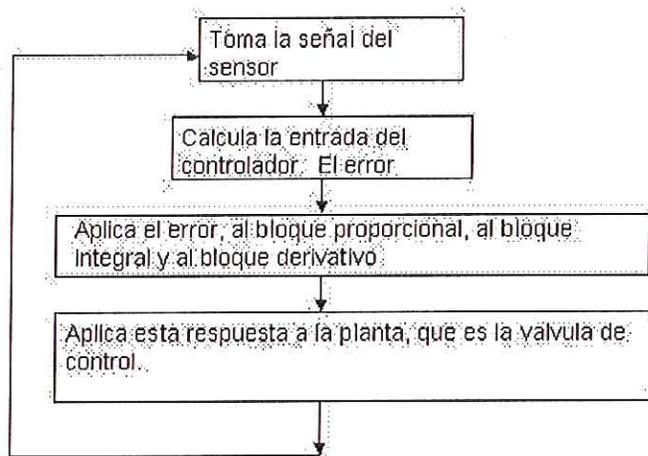


Figura 66. Algoritmo de control PID

6.3 METODOLOGIA DE DISEÑO

Para el diseño e implantación del controlador PID se siguieron las siguientes etapas:

- Definición de las características del controlador. Definición de la parte integral del error, y de la deriva del error, en el tiempo, de acuerdo a las señales obtenidas del mismo.
- Trabajo directo con el sistema, realizando, el control y obteniendo respuestas a prueba y error.
- Diseño del software controlador PID, en ambiente LABWINDOWS/CVI.
- Optimización el sistema. Se ajustan los parámetros de control, mediante el método de Ziegler – Nichols para lograr la estabilidad y la adaptabilidad del proceso.

6.3 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Ver anexos pagina 232.

6.4 DIAGRAMA DE BLOQUES

El diagrama de bloques del sistema es el siguiente:

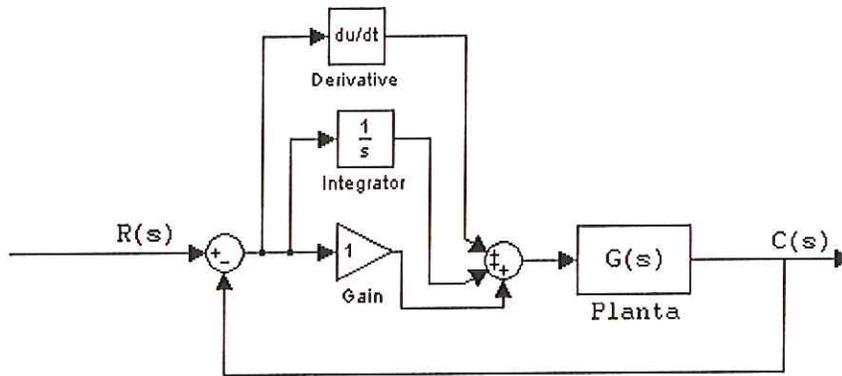


Figura 67. Diagrama de bloques controlador PID

El controlador PID, presenta una función de transferencia de la forma:

$$G_c(s) = K_p \frac{\left(T_d s^2 + \frac{1}{T_i} + s \right)}{s}$$

Y en función del tiempo, la salida del controlador esta dada por:

$$U(t) = Y_0(t) + K_p * \left(error + \frac{1}{T_i} \int error * dt + T_d * \frac{d(error)}{dt} \right)$$

Para la programación del controlador, la derivada del error con respecto al tiempo esta dado por:

$$\frac{d(error)}{dt} = \frac{(error \text{ ant} - error \text{ nuevo})}{Control \text{ Rate}}$$

Y la integral del error en el tiempo es:

$$\int error * dt = \left[\frac{(error \text{ ant} - error \text{ nuevo}) * Control \text{ Rate}}{2} \right] + [Control \text{ Rate} * error \text{ nuevo}]$$

Esta forma de calcular la integral se realiza, mediante el área bajo la curva del error. Donde, se presenta en cada intervalo de control, un triángulo y un rectángulo, Esto se puede observar en la grafica del error.

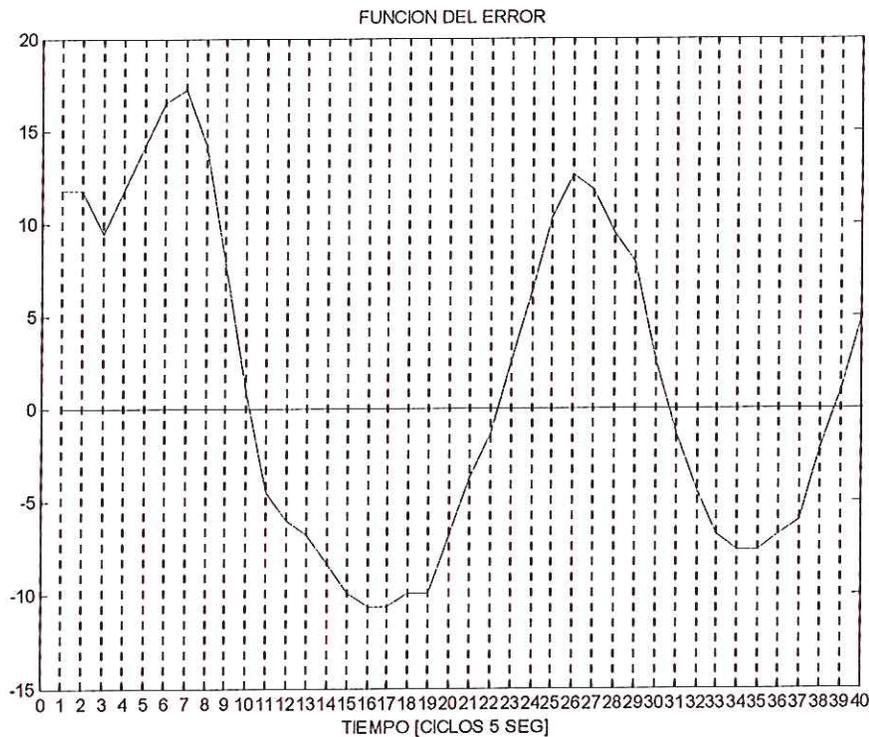


Figura 68. Función del error en el tiempo

Para la planta del sistema se tiene la función de transferencia, dependiendo de la ganancia de la válvula K_v , y de la constante de tiempo del actuador de la misma T_v .

$$Gp(s) = \frac{K_v}{\tau_v s + 1}$$

6.6 SINTONIZACIÓN

Para poder lograr la sintonización del controlador clásico se utilizó el método de oscilación de Ziegler – Nichols, los pasos que se realizaron fueron los siguientes:

1. Aplicar a la planta sólo control proporcional con ganancia K_p pequeña.
2. Aumentar el valor de K_p hasta que el lazo comience a oscilar. La oscilación debe ser lineal y debe detectarse en la salida del controlador ($u(t)$).

3. Registrar la ganancia crítica $K_p = K_c$ y el período de oscilación P_c de $u(t)$, a la salida del controlador.
4. Ajustar los parámetros del controlador PID de acuerdo a la siguiente figura

	K_p	T_r	T_d
P	$0,50K_c$		
PI	$0,45K_c$	$\frac{P_c}{1,2}$	
PID	$0,60K_c$	$\frac{P_c}{2}$	$\frac{P_c}{8}$

Tabla 9. Parámetros para cuadrar las constantes del controlador tradicional

6.6.1 SINTONIZACIÓN CONTROL DE CAUDAL

El primer paso fue elaborar diferentes pruebas, eliminando, los parámetros integral y derivativo, aumentado el parámetro proporcional, hasta que la respuesta del controlador oscilara.

De tal forma que se identificara la respuesta que oscilara con la menor constante proporcional, y poder calcular el periodo de oscilación para determinar de acuerdo al método de Ziegler – Nichols, el tiempo de integración y el tiempo derivativo.

Se selecciono la constante proporcional igual a 3, y la respuesta que se obtuvo fue la siguiente:

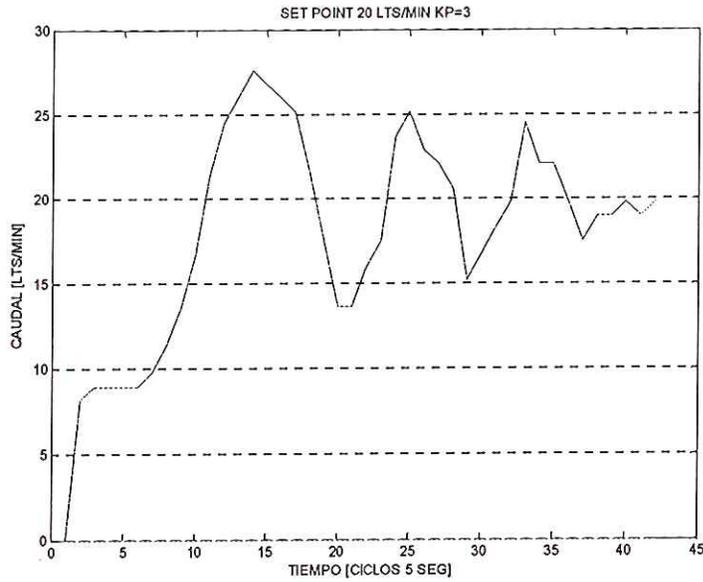


Figura 69. Respuesta del controlador para un $k_p=3$

Mediante este resultado, podemos obtener que el periodo de oscilación es de 10 ciclos, por lo que el tiempo derivativo es igual a 1.25 ciclos, y el tiempo integral es igual a 5 ciclos. Realizada la prueba del sistema con estas constantes y con diferentes setpoints, la respuesta del controlador obtenida fue la siguiente:

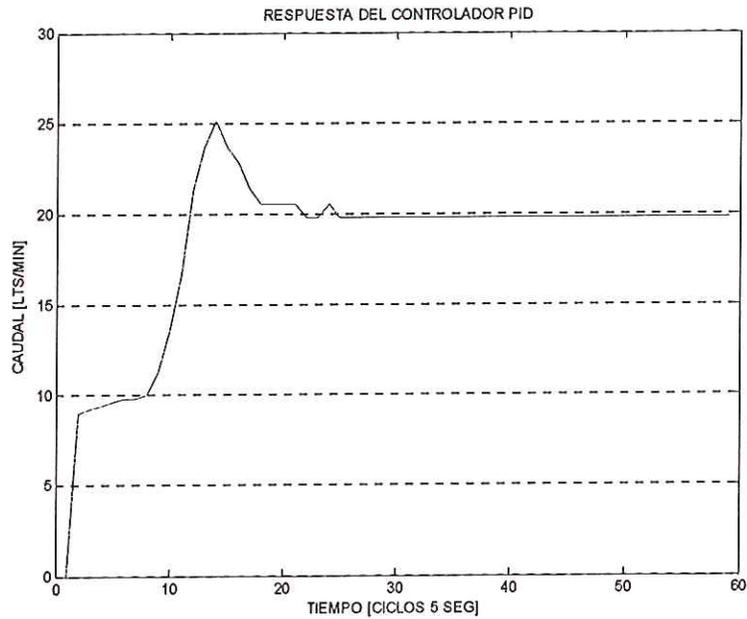


Figura 70. Respuesta del controlador PID set point 20 lts/min

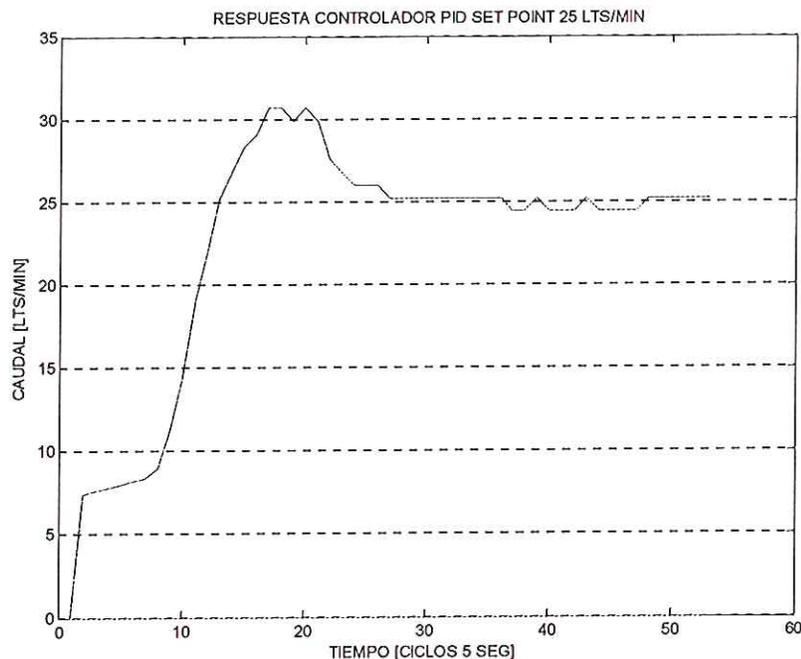


Figura 71. Respuesta del controlador PID set point 25 lts/min

Al aplicar el controlador PID al sistema, se pueden obtener respuestas mucho mas estables, con un menor sobre impulso y en un tiempo de estabilidad mas pequeño, que para el controlador proporcional solo.

Las otras grafica que se obtuvieron de los diferentes k_p , y de otras pruebas con externalidad se pueden observar en los anexos de este trabajo. Determinamos externalidad como alguna falla que se pueda presentar y que disminuya el caudal que la bomba envía, por lo cual el sistema tiene que responder rápidamente para mantener la consigna de caudal que tenga.

6.6.2 SINTONIZACION CONTROL DE TEMPERATURA

Para el control de temperatura, se realizo el mismo procedimiento, se realizaron pruebas con diferentes constantes proporcionales, de tal forma que se selecciono, la banda proporcional más pequeña, que hace que la respuesta del controlador sea oscilante.

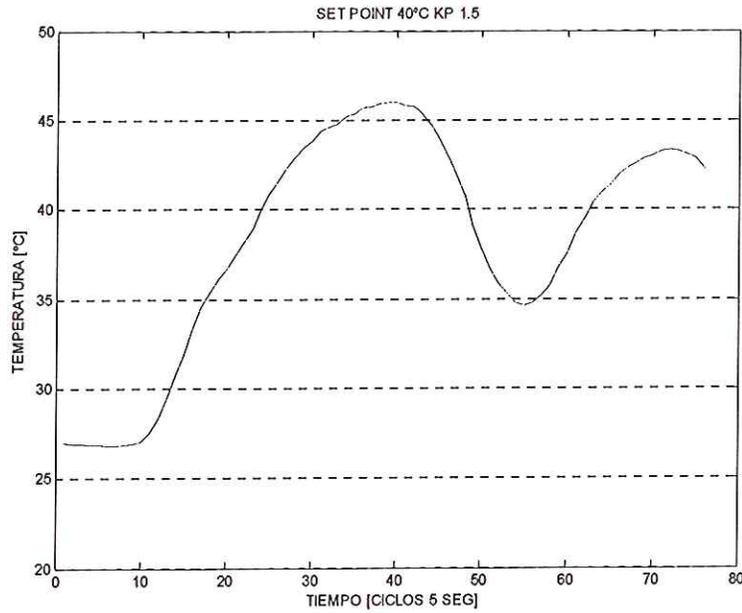


Figura 72. Respuesta del controlador PID set point 40 °C

En la respuesta el periodo de oscilación es de 30 ciclos, por lo cual el tiempo integral sería igual a 15 ciclos y el tiempo derivativo sería igual a 4 ciclos. Y por consiguiente la constante proporcional sería igual a 0.9 ciclos.

La respuesta que se obtiene es la siguiente

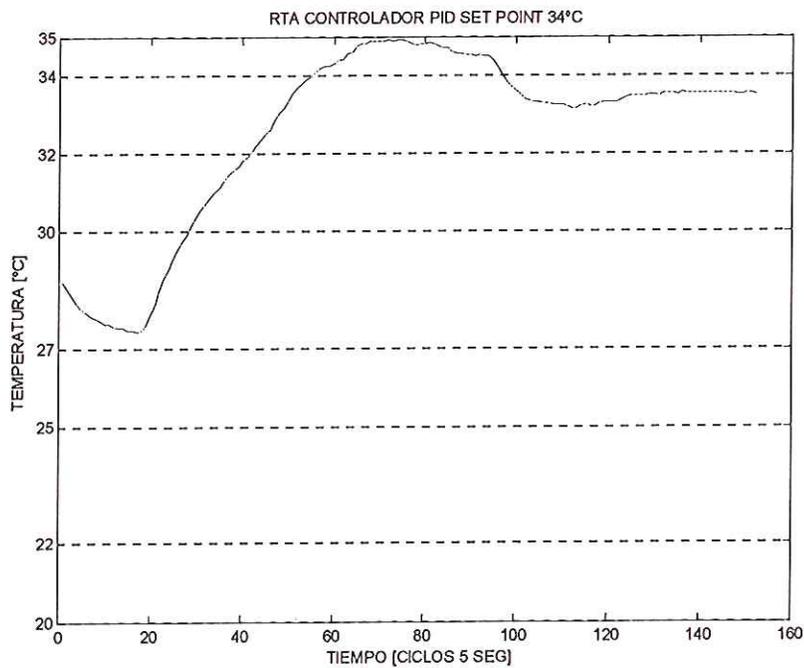


Figura 73. Respuesta del controlador PID set point 34 °C

6.7 SUBROUTINAS DEL CONTROLADOR

El controlador PID, tiene una única subrutina, en ella, toma el valor del setpoint, y sensa el valor de la variable a controlar, calcula el error, y toma el valor de los parámetros de control, y calcula la salida de corriente que va hacia la válvula de control. Esta subrutina es la misma para el control de caudal y el control de temperatura.

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_Control_Rate, &controlRate);
SetCtrlAttribute (panelHandle, PANEL_TIMER, ATTR_INTERVAL,controlRate);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CONTROLCAUDAL, &opcionn);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_Kp, &Kp);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_kd_caudal, &kdcaudal);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_ki_caudal, &kicaudal);
Kp=Kp*pow(10,-4);
kdcaudal=kdcaudal*pow(10,-4);
if (opcionn)
{
  GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_SET_POINT, &setpoint);
  error=Leercaudal(setpoint);
  integralcaudal= ((error-errorant)*controlRate)/2+(errorant*controlRate);
  derivadacaudal= (error-errorant)/controlRate;
  kicaudal= 1/kicaudal;
  kicaudal=kicaudal*pow(10,-4);
  temp= temp0 + (Kp*(error+(kdcaudal*derivadacaudal)+(kicaudal*integralcaudal));
  errorant=error;
}
```

Donde integralcaudal y derivadacaudal, son las operaciones realizadas, para calcular el valor de la integral del error y la derivada del error a través del tiempo. Ki, Kp y Kd del caudal, son los parámetros, y temp, es el valor de la salida del controlador. La variable controlRate, es la variable, que se encarga de almacenar el tiempo de muestreo, que el controlador va a tener. (Este valor es asignado por el usuario del sistema).

7. CONTROLADOR DIFUSO

Como todos sabemos, un PID se compone de una acción Proporcional-Derivativa-Integral. La primera establece la ganancia, la segunda, controla el transitorio y la última, el régimen permanente. En el controlador difuso se emplean dos de estos conceptos: el error y el cambio de error, conocido normalmente como el gradiente.

Estas variables se constituyen en las entradas propiamente dichas del controlador difuso. Para La implantación del controlador difuso se dispone de diversas alternativas que van desde configuraciones basadas en *hardware* hasta las desarrolladas fundamentalmente en *software*, como es el caso nuestro.

7.2 SISTEMA DE CONTROL

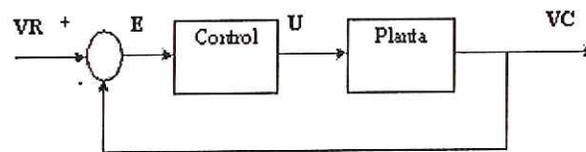


Figura 74. Sistema de control difuso en lazo cerrado

Control de temperatura

El control de Temperatura, tendrá como objetivo conseguir que el agua que sale del intercambiador de calor logre el valor de la temperatura de consigna y luego mantenerla en ese valor aún ante perturbaciones externas. Es decir, deberá actuar sobre la válvula de control quien es la que suministra la cantidad de vapor que calienta el agua. La entrada a este sistema de control, será el error de temperatura y el gradiente, obtenidos desde el sensor colocado a la salida del intercambiador, y la salida controlará la cantidad de corriente necesaria para abrir la válvula proporcional.

Control de Caudal

El control de caudal, tiene como objetivo conseguir que el flujo másico de agua que entra al intercambiador de calor, logre el valor de consigna, y pueda mantenerlo durante su operación, y aun ante perturbaciones. Esto quiere decir que deberá actuar sobre la válvula de control quien es la que estrangula la cantidad de agua que ingresa al sistema. Las entradas del sistema, serán el error obtenido a través del sensor de caudal instalado a la entrada del sistema, y el cambio del error en el tiempo, y la salida controlará la cantidad de corriente necesaria para manipular la válvula proporcional.

Ambos procesos comienzan, calculando la diferencia entre la temperatura medida y la temperatura deseada, o del caudal medido y el caudal deseado. De esta manera conocemos el Error. Luego, calculamos el gradiente, restando el nuevo error del anterior. Una vez conocidas estas variables, que constituyen las entradas del controlador de Lógica Difusa, se procede a realizar la fuzzificación, la inferencia y la defuzzificación para obtener la salida del controlador. Esta salida, obtendrá valores desde 0 a 20 mA, quienes representarán ángulos de apertura de la válvula proporcional.

7.2 ALGORITMO DE CONTROL

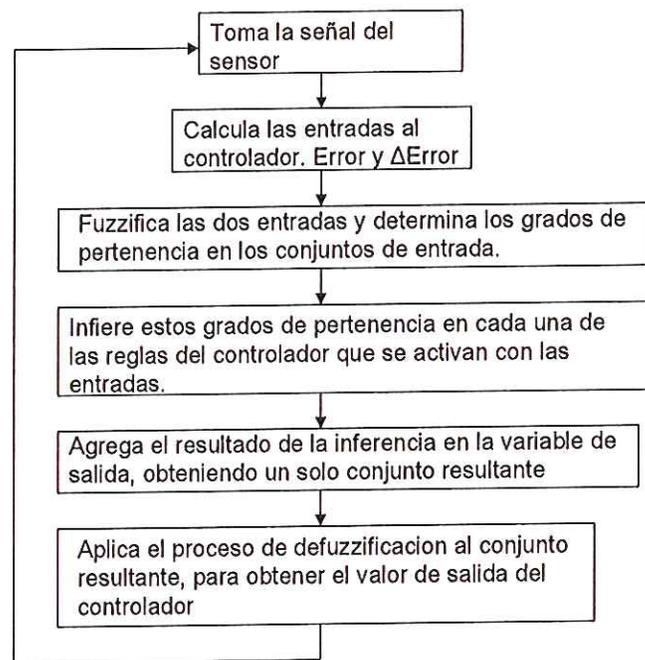


Figura 75. Algoritmo del controlador difuso

7.3 METODOLOGIA DE DISEÑO

Para el diseño e implantación del controlador lógico-difuso (CLD) se siguieron las siguientes etapas:

- Definición de las variables difusas y conjuntos difusos para expresar las observaciones del proceso en el lenguaje lingüístico de la lógica difusa. Tanto para la temperatura, como para el caudal.

- Diseño de la base de reglas difusas, basadas en los operadores y expertos en el proceso a utilizar. Se escribieron primero las reglas obvias y posteriormente las reglas restantes.
- Diseño del software controlador difuso, en ambiente LABWINDOWS/CVI.
- Optimización el sistema. Se sintonizan las reglas y/o se modifican los conjuntos de entrada/salida para lograr la estabilidad y la adaptabilidad del proceso.

7.4 DISEÑO DEL CONTROLADOR

Para el diseño del controlador difuso, se utilizó la herramienta Fuzzy FIS editor, del software MATLAB. Esto se realizó con la intención de verificar el correcto funcionamiento de las reglas planteadas, y el buen desempeño del tipo de funciones de pertenencia escogidas.

Control de Caudal

En el control de caudal, al controlador le entran dos variables, el error y el cambio del error en el tiempo. Para estas variables, se escogieron las siguientes funciones de pertenencia.

Error del caudal

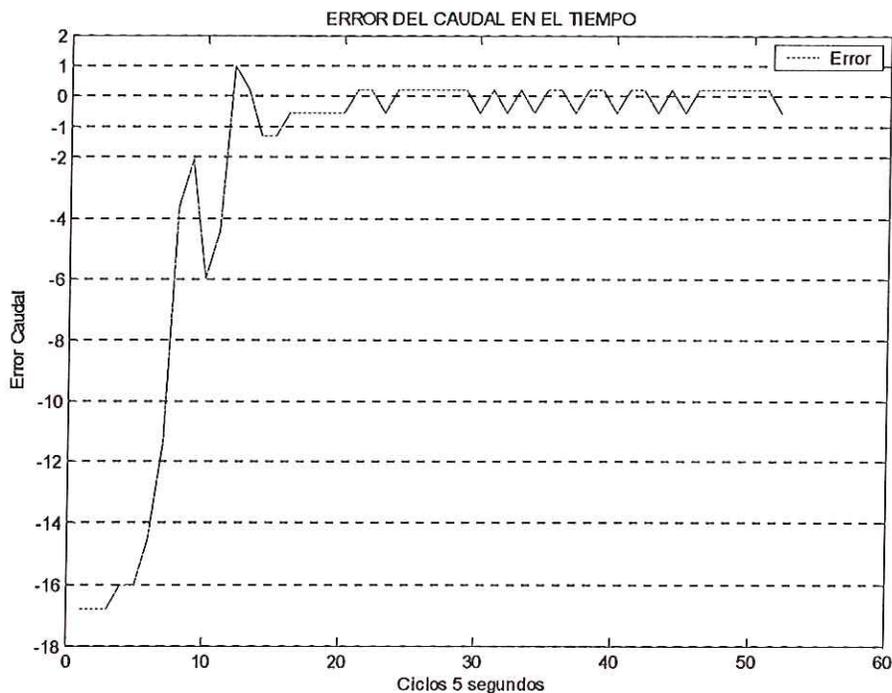


Figura 76. Comportamiento del error de caudal en el tiempo

Se determina, mediante el comportamiento de la variable, que se pueden trabajar con tres etiquetas lingüística para la variable del error, error negativo, error zero y error positivo. Esto se considera, ya que se observa que el error máximo, en este caso de -16 lts/min, no es lo suficientemente grande, como para aplicar una etiqueta mas de error negativo, (grande o pequeño), y aumentar el numero de conjuntos.

De igual forma el error positivo, que es el error que se da cuando el sistema alcanza el sobretiro (Sobrepasa el valor de consigna), no es lo suficientemente grande, como para querer aplicar mas conjuntos difusos, como el de error positivo grande, medio o pequeño. Es por esto que se decide trabajar únicamente con tres conjuntos difusos para la variable error.

En cuanto al tipo de funciones de membresía que se utilizaran, podemos determinar que de acuerdo al comportamiento del error negativo y el error positivo, se puede aplicar una función tipo L para estos conjuntos, pues a partir de un punto determinado, su valor crece en gran proporción, lo cual indica que su grado de pertenencia al conjunto, es el máximo (1), cualidad que se ajusta al tipo de función escogida.

De igual forma, el comportamiento que permite este tipo de función, después del punto de pertenencia máxima, describe la línea recta con pendiente grande, lo cual se adecua al modo de decrecimiento que presenta la variable, y que puede ser observada en la grafica de su comportamiento.

Para el conjunto de error zero, se puede determinar, que el comportamiento de la variable, en la zona de error, tiene cambios bruscos, pues pasa de negativo a positivo, en un solo instante de tiempo, pasando por el cero.

Lo cual nos indica que podemos utilizar una función de membresía de tipo triangular, que nos permite obtener un grado de pertenencia máximo, en un único punto, y grados de pertenencia altos para este conjunto, en el momento que la variable se aproxime a zero.

Δ Error del caudal

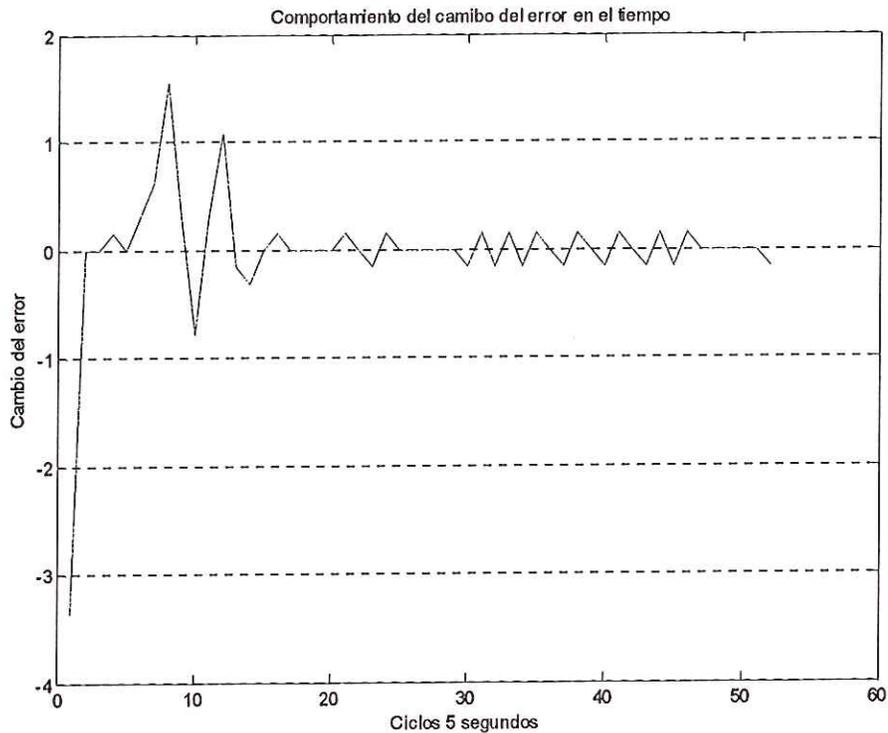


Figura 77. Comportamiento del cambio del error de caudal en el tiempo

Como podemos observar en la grafica del comportamiento del cambio del error, este depende lógicamente del comportamiento del error, por lo cual se decidió trabajar con el mismo numero de conjuntos difusos para esta variable, y con el mismo tipo de funciones de membresía.

Para el cambio del error positivo y negativo, se trabajo con funciones tipo L, con las cuales se puede aprovechar los cambios bruscos que esta variable realiza y conseguir una adecuada respuesta del sistema. De igual forma se observa que se puede considerar, a partir de cierto valor del cambio del error, se tenga la máxima pertenencia al conjunto y, represente una mayor inferencia en el sistema lo cual se traduce en una mejor respuesta del controlador.

En cuanto al numero de conjuntos difusos para esta variable, podemos observar que no se obtienen valores muy grandes, ni positivos , ni negativos, razón por la cual con tres conjuntos difusos, negativo, positivo y zero, son suficientes para describir el comportamiento de la variable.

Corriente de Salida

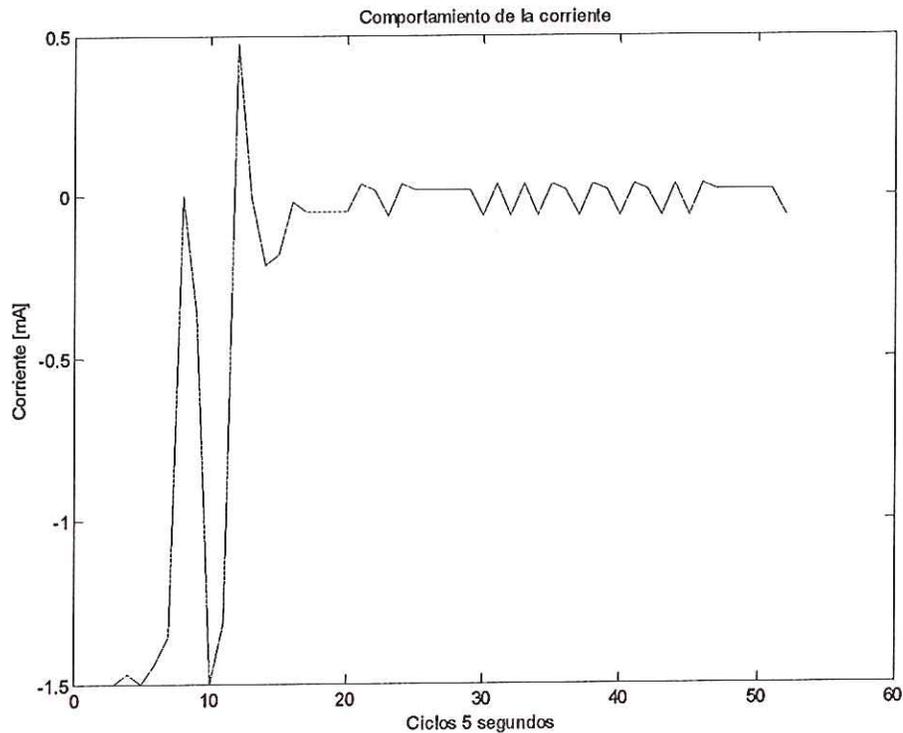


Figura 78. Comportamiento de la corriente de salida

Para la variable de salida, la corriente, se van a utilizar tres conjuntos difusos, el conjunto cerrar, que lo conforman corrientes negativas (Encargado de cerrar la válvula, esto porque la válvula esta normalmente abierta), el conjunto abrir, que lo conforman las corriente positivas, y el conjunto no operar.

Esto se determino, ya que según observamos, el rango de corriente que el sistema entrega es lo suficientemente estrecho, que permite describir su comportamiento, únicamente con estos tres etiquetas lingüísticas.

En cuanto a la funciones de membresía que se van a utilizar son de tipo L para los conjuntos abrir y cerrar y de tipo triangular para el conjunto no operar. De acuerdo al comportamiento de la corriente, para los conjuntos abrir y cerrar, con los cuales se pretende aumentar o disminuir la corriente entregada por el controlador, podemos utilizar funciones de membresía tipo L, pues estas permiten tener un aumento o una disminución de sus valores de una forma rápida, pues presentan un comportamiento lineal.

Para la etiqueta no operar, se escogió la función de tipo triangular, pues como podemos identificar en la grafica 77, debido a la búsqueda del punto de consigna, se hace necesario, permitir a esta variable, cambios bruscos en su comportamiento, en cuanto a enviar corrientes negativas o positivas según sea necesario.

DISEÑO DEL CONTROLADOR DE CAUDAL A TRAVES DE LA HERRAMIETA FIS EDITOR DE MATLAB

Se utilizo esta herramienta, para diseñar el controlador, pues con ella podemos, verificar el adecuado comportamiento de las reglas y sus respuestas, de acuerdo al tipo de función de membresía utilizado y de acuerdo a la longitud de los mismos. El primer paso que se realizo, para el diseño, fue el elaborar los conjuntos difusos de cada una de las variables que entrar al controlador.

Para la variable del error, se tienen los siguientes conjuntos de pertenencia.

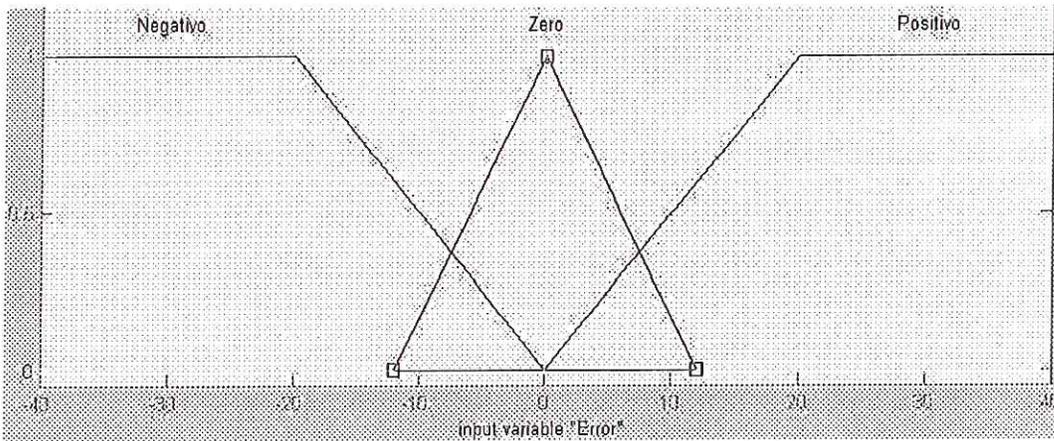


Figura 79. Conjuntos difusos del Error

Para esta variable, se selecciono un universo de discurso, de -40 , hasta 40 , pues el caudal máximo, que el sistema permite circular, es de aproximadamente 36 lts/min.

Para la variable del cambio del error, se tienen los siguientes conjuntos de pertenencia.

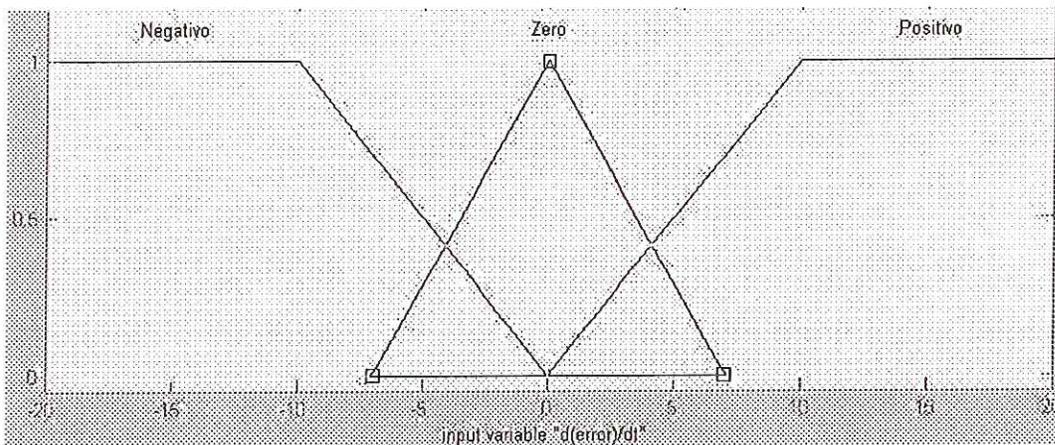


Figura 80. Conjuntos difusos del cambio del error

El universo de discurso, que se selecciono para esta variable es $[-20,20]$, pues en ningún momento, vamos a tener un cambio mas alto del error en un solo instante de tiempo.

Para la variable de salida, la corriente, se tienen los siguientes conjuntos de pertenencia.

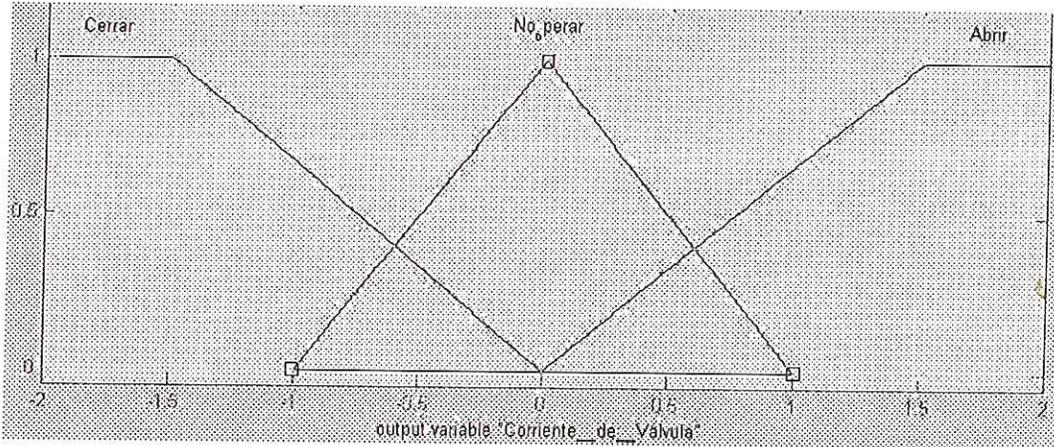


Figura 81. Conjuntos difusos de la corriente

Posteriormente a eso, se procede a ingresar las reglas difusas, tipo Mamdani, las cuales, fueron elaboradas con colaboración de un experto en el tema de intercambiadores de calor.

La matriz de reglas quedo de la siguiente forma:

Δ Error \ Error	Negativo	Zero	Positivo
Negativo	Cerrar	Cerrar	No operar
Zero	Cerrar	No operar	Abrir
Positivo	No operar	Abrir	Abrir

Tabla 10. Matriz de reglas del controlador difuso

Una vez están planteadas las reglas, se procedió, a la simulación del comportamiento del controlador, y la verificación del adecuado funcionamiento de las reglas.

A continuación se presentaran diferentes puntos de trabajo, mediante los cuales se pueden hacer la verificación del funcionamiento.

Como primer punto, se tomara, un error negativo, y un cambio del error cero; simulando el punto de partida del controlador, al poner en marcha el control.

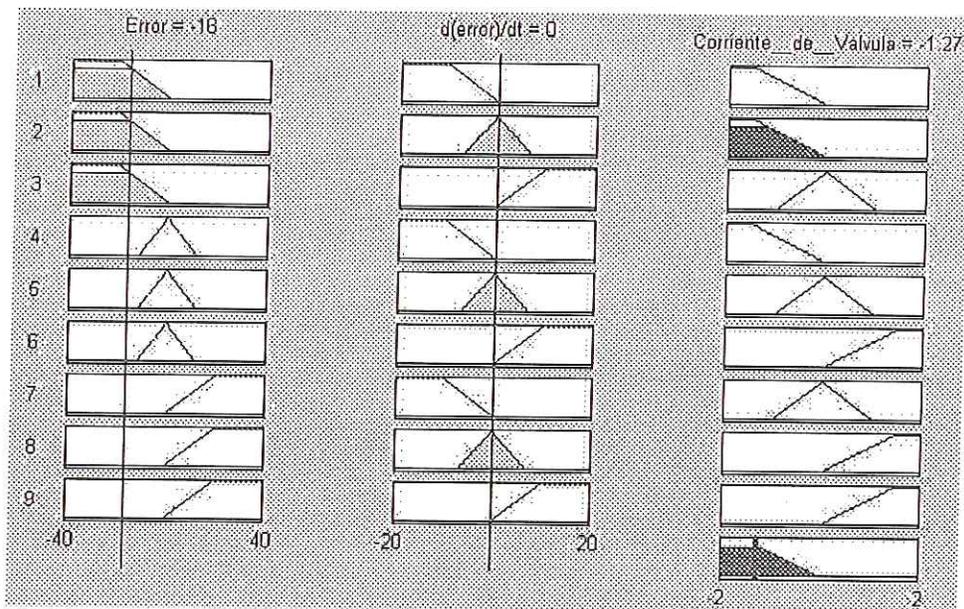


Figura 82. Respuesta del controlador difuso para Error = -16 y Δ Error = 0

En la figura 82, podemos observar, que la única regla que se activa es la número 2, dando como el conjunto resultante del controlador, el conjunto resultante de dicha regla. El controlador envía como respuesta el resultado de la defuzzificación (-1.27), lo que indica cerrar válvula; debido a que la válvula de agua, esta normalmente abierta, y debe cerrarse, para permitir el paso del agua al sistema, y disminuir el error inicial.

Para analizar un segundo punto de trabajo, se tomara, un error negativo, y un cambio del error positivo.

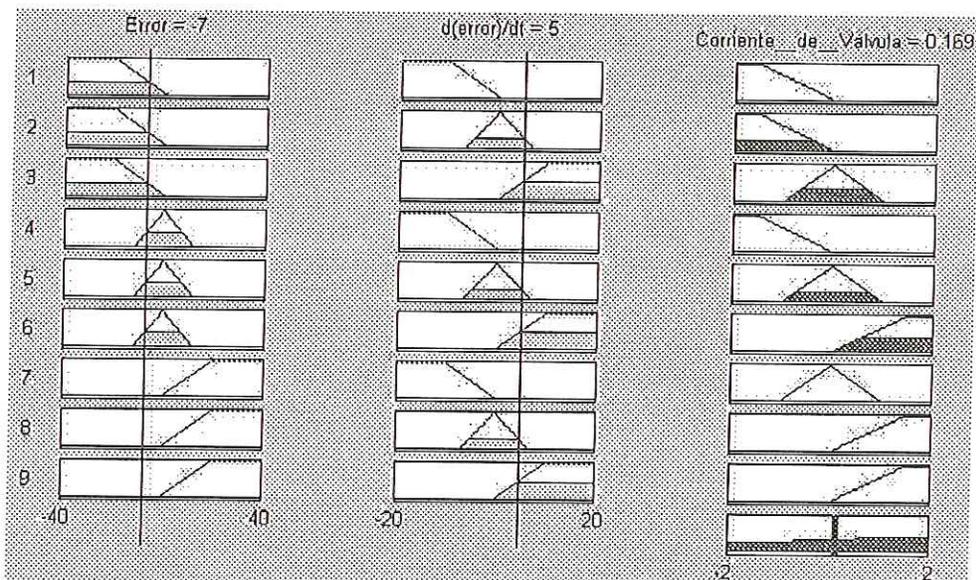


Figura 83. Respuesta del controlador difuso para Error = -7 y Δ Error = 5

Acá, figura 83 podemos observar, que se activan las reglas 2,3,5 y 6, y que con la agregación de los conjuntos resultantes de cada una de las reglas, se forma un único conjunto de salida, y que la respuesta a la defuzzificación es 0.169, lo que indica abrir válvula. Se puede ver, que el controlador, indica abrir válvula (disminuir el caudal de trabajo), a pesar de que existe un error negativo, lo que indica que aun no se ha logrado el caudal de consigna.

Esto ocurre, debido a que la naturaleza de las reglas, le indican al controlador, que se esta acercando al set point, pero que se debe disminuir un poco la pendiente con la cual se esta acercando, de tal forma que se puede eliminar el sobretiro .

Por el contrario en la grafica 83, a pesar de que la naturaleza de las variables de entrada es la misma que la de la grafica 82, la respuesta del controlador es cerrar válvula (-0.441), pues a pesar de que tiene una pendiente positiva (Δ Error positivo), el error es aun grande, y debe seguir cerrando la válvula.

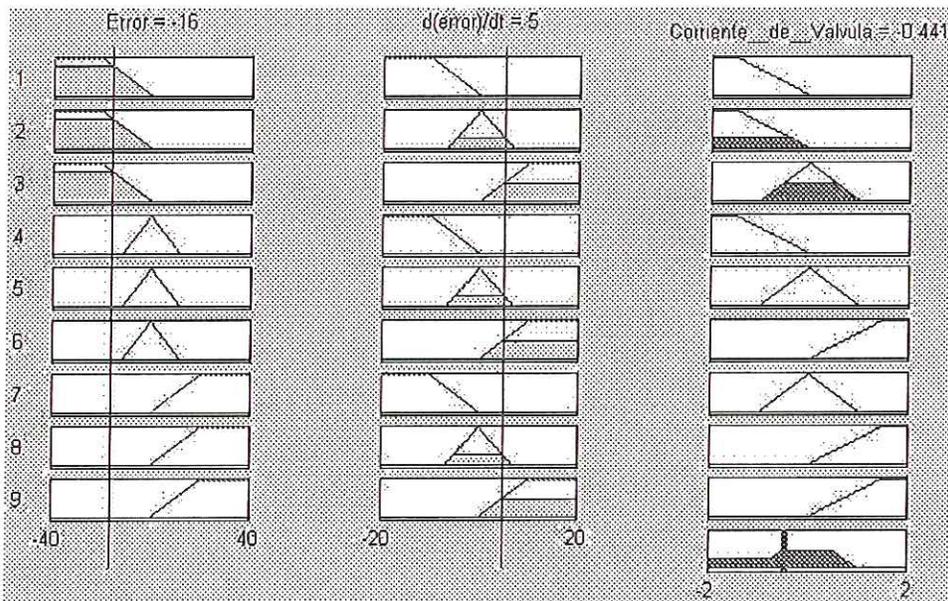


Figura 84. Respuesta del controlador difuso para Error =-16 y Δ Error =5

Otro punto que se analizo, fue el momento en el que al controlador entre un error positivo y un cambio del error positivo (Figura 84), lo cual indica, que el caudal se paso del punto de consigna, y tiene una pendiente positiva, que puede ocasionar alejarse mucho y provocar un sobretiro muy alto en la respuesta del sistema.

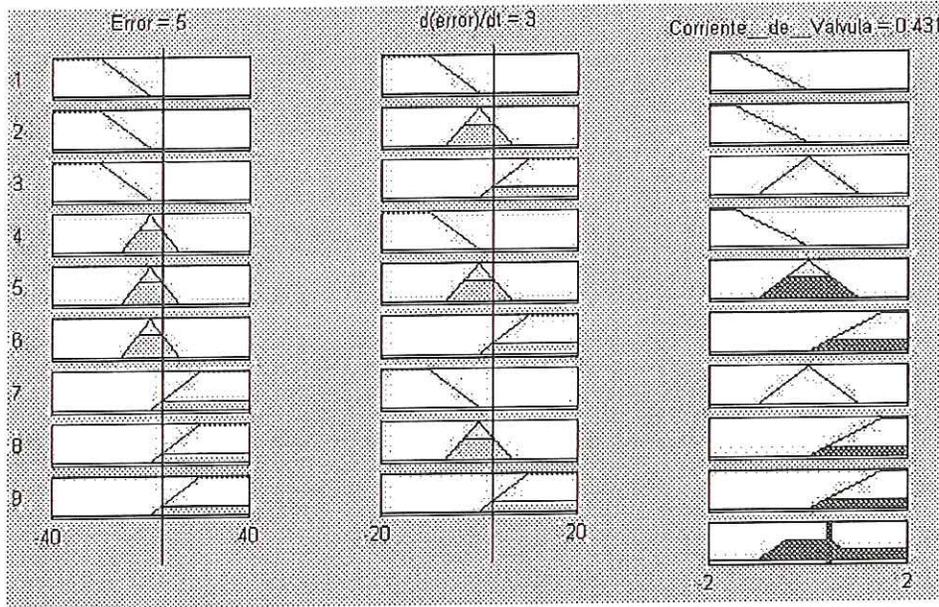


Figura 85. Respuesta del controlador difuso para Error = 5 y Δ Error = 3

En este caso, se activan las reglas numero 5 y 6, y la respuesta del controlador es abrir la válvula en 0.431, pues debe eliminar ese error y conseguir el punto de consigna.

Para un caso parecido, el de la figura 85, en el que se tiene un error positivo, pero un cambio en el error negativo, lo que significa, que a pesar de que el caudal de trabajo, se paso del caudal de consigna, al tener una pendiente negativa, este esta disminuyendo para acercarse al set point.

Razón por la cual, el controlador envía una respuesta de $9.18E-18$ (aprox. 0).

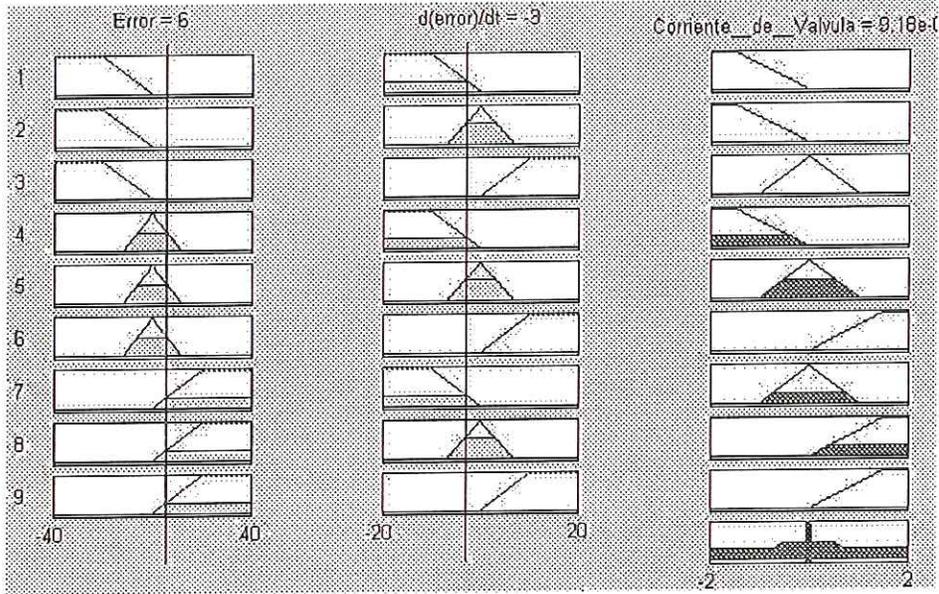


Figura 86. Respuesta del controlador difuso para Error = 6 y Δ Error = -3

Por ultimo en la figura 86, podemos observar el comportamiento del controlador, en el instante en el cual se consigue el caudal de consigna, es decir un error cero y un cambio del error igual a cero.

Para este caso solamente se activa la regla numero 5, y la respuesta del controlador se obtiene al aplicar el proceso de defuzzificación al conjunto resultante de la inferencia de esta única regla.

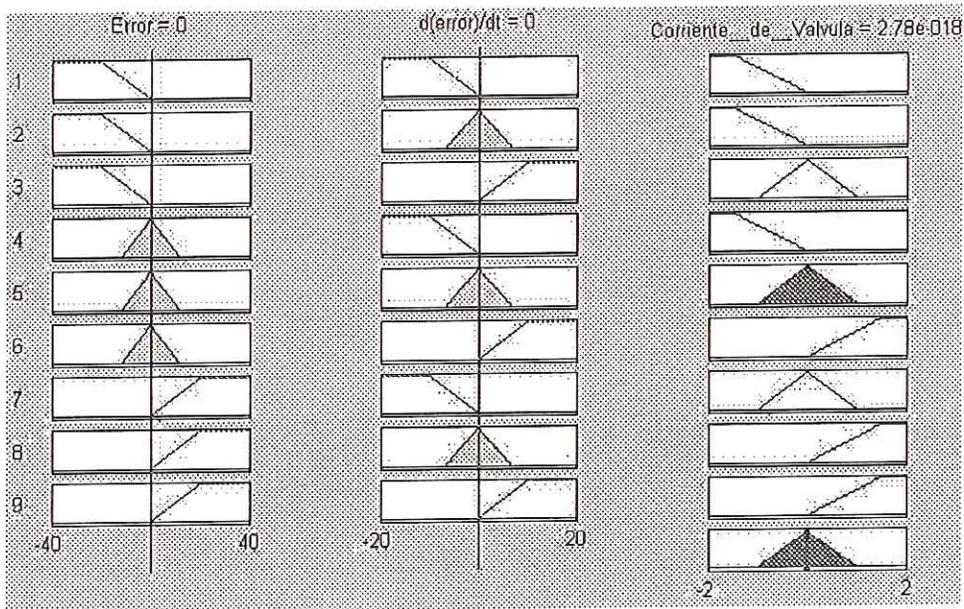


Figura 87. Respuesta del controlador difuso para Error = 0 y Δ Error = 0

Control de Temperatura

Para el control de temperatura, las entradas del controlador, son también el error y el cambio del error en el tiempo, y la salida es corriente, para alimentar la válvula de control que estrangula la cantidad de vapor.

Error de temperatura

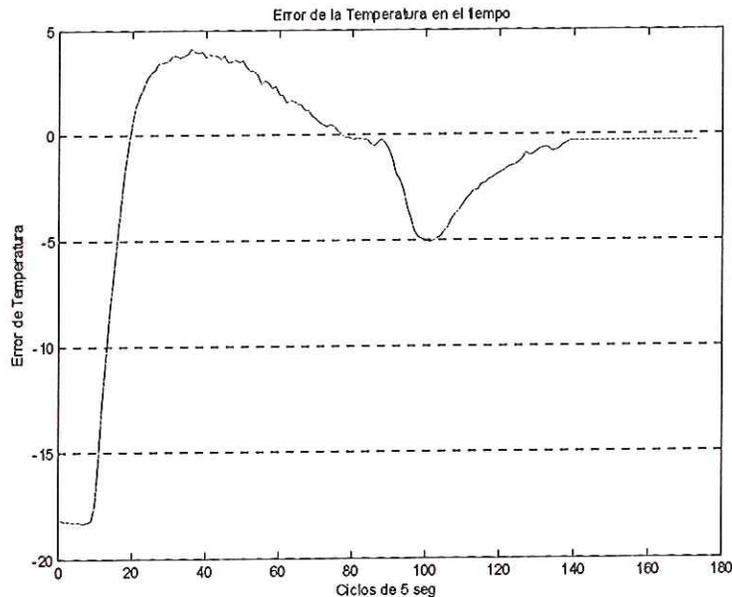


Figura 88. Comportamiento del error de la temperatura

De igual forma que en el control de caudal, la variable del error de la temperatura, puede tener únicamente tres conjuntos difusos que modelen su comportamiento (Negativo, Zero, Positivo). Esto lo podemos determinar, pues como se observa en la Figura 87, el error positivo y negativo, son pequeños, por lo cual es suficiente con estos tres conjuntos difusos.

En cuanto a el tipo de función de membresía que esta variable utiliza, según su comportamiento, podemos modelar el error positivo y negativo, como una función tipo L, que a partir de un punto determinado presenta un valor de pertenencia igual a la unidad, y presenta una línea recta con pendiente grande, la cual puede describir la forma en que crece o decrece la variable, de una forma rápida. Y en el conjunto zero, se utiliza una función tipo triangular, pues tendremos un valor de pertenencia máximo (1), en un único punto, y podemos describir su crecimiento y decrecimiento en una forma abrupta, a través de este tipo de función.

Δ Error del caudal

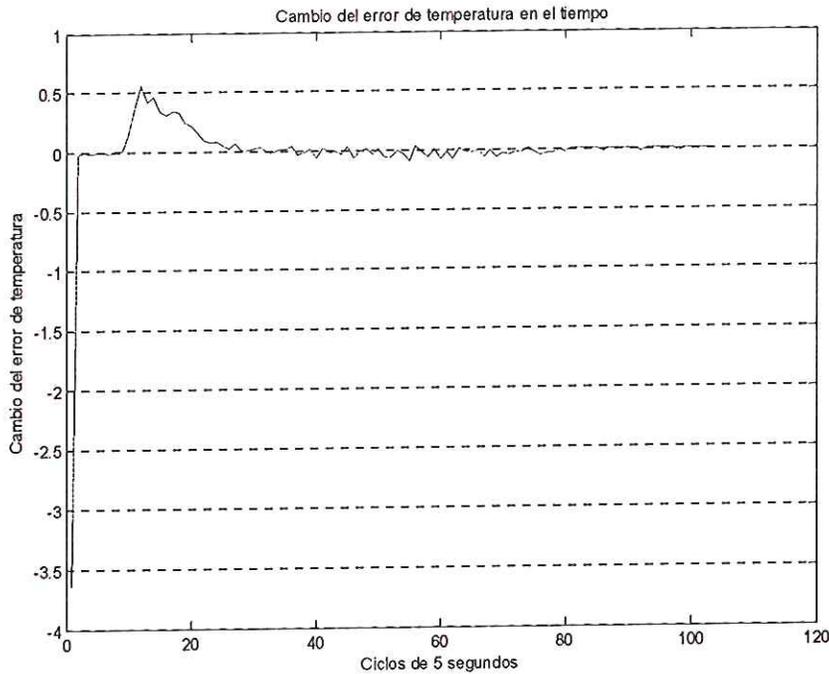


Figura 89. Comportamiento del Cambio del error de la temperatura

Para el cambio del error en el tiempo, podemos observar en su comportamiento (Figura 88), que el rango de valores en el que esta variable se encuentra, es pequeño. Razón por la cual podemos modelar su naturaleza, mediante tres conjuntos difusos.

Esta variable se utilizara con funciones de membresía tipo L para los conjuntos negativo y positivo y de tipo triangular para el conjunto zero.

Las clases de función de pertenencia escogidas, modelan el comportamiento de la variable, en cualquiera de sus puntos, por ejemplo, para el conjunto zero, la función triangular, le permite presentar un valor máximo de pertenencia en un unción valor (0). Por su parte la función tipo L, permite obtener un máximo valor a partir de un punto determinado.

Corriente de Salida

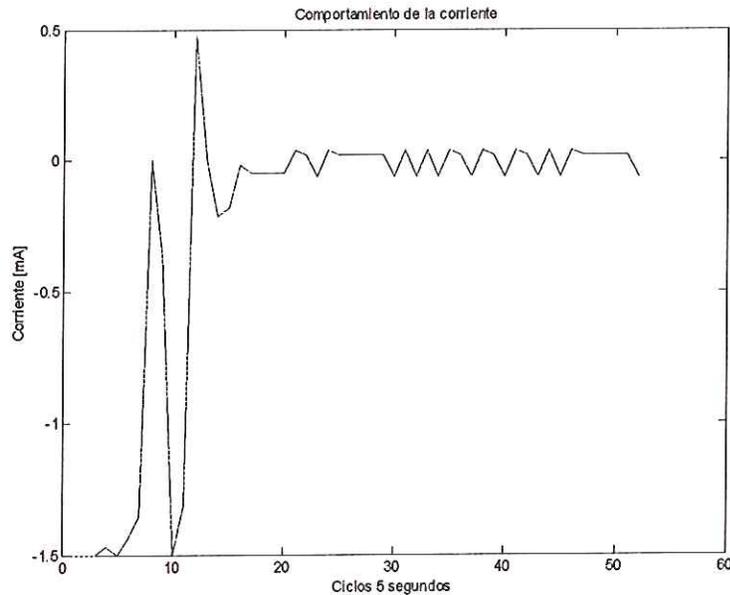


Figura 90. Comportamiento de la corriente de salida

Para la variable de salida, la corriente, se van a utilizar tres conjuntos difusos, el conjunto cerrar, que lo conforman corrientes negativas, el conjunto abrir, que lo conforman las corriente positivas, y el conjunto no operar.

Esto se definió, según observamos en su comportamiento (figura 89), pues el rango de corriente que el sistema entrega es lo suficientemente estrecho, que permite describir su comportamiento, únicamente con estos tres conjuntos.

En cuanto a la funciones de membresía que se van a utilizar son de tipo L para los conjuntos abrir y cerrar y de tipo triangular para el conjunto no operar. De acuerdo al comportamiento de la corriente, para los conjuntos abrir y cerrar, con los cuales se pretende aumentar o disminuir la corriente entregada por el controlador, podemos utilizar funciones de membresía tipo L, pues estas permiten tener un aumento o una disminución de sus valores de una forma rápida, ya que presentan un comportamiento lineal.

Para la etiqueta no operar, se escogió la función de tipo triangular, pues como podemos identificar en la grafica 89, debido a la búsqueda del punto de consigna, se hace necesario, admitir que esta variable, realice cambios bruscos en su comportamiento, en cuanto a enviar corrientes negativas o positivas según sea necesario.

DISEÑO DEL CONTROLADOR DE TEMPERATURA A TRAVÉS DE LA HERRAMIENTA FIS EDITOR DE MATLAB

Primero que todo se deben construir los conjuntos de cada una de las variables de entrada y salida, con su universo de discurso, y con el tipo de función de pertenencia que cada conjunto describirá.

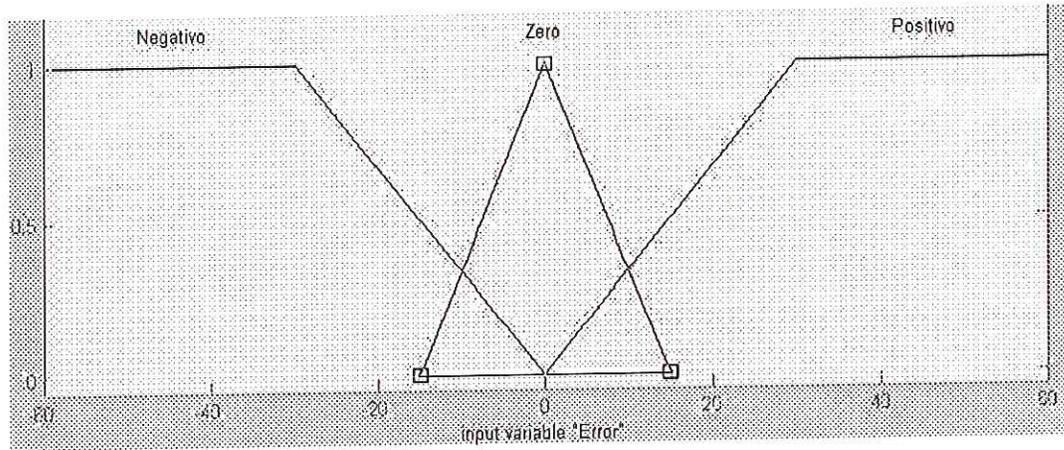


Figura 91. Conjunto difusos del Error

Para la variable del error se selecciono un universo de -60 a 60 grados Celsius, pues la temperatura máximo a controlar no sobrepasa los 55 grados.

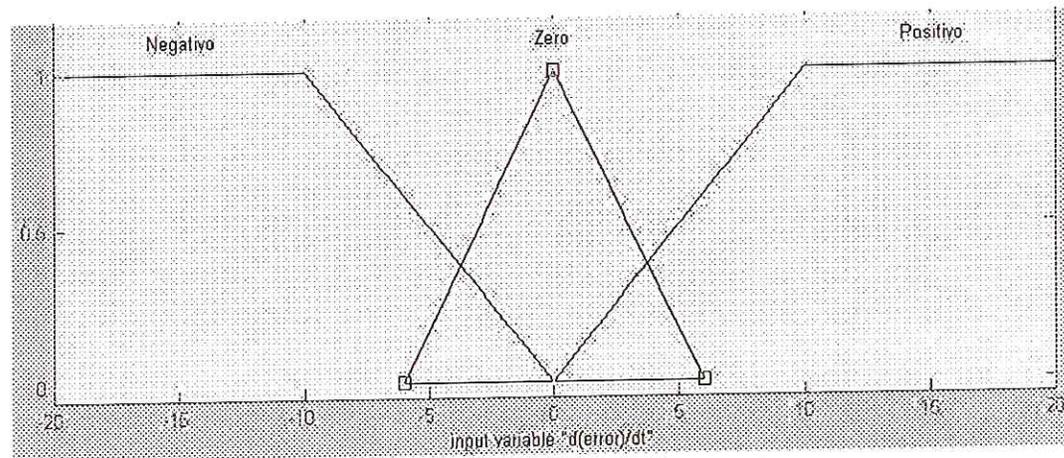


Figura92. Conjunto difusos del Cambio del Error

Para el cambio del error, el universo de discurso escogido, es de -20 a 20 , aunque en su comportamiento observamos que el crece o decrece en valores pequeños, se diseño de esta forma, por si se presenta algún cambio brusco, el controlador no se afecte en su comportamiento.

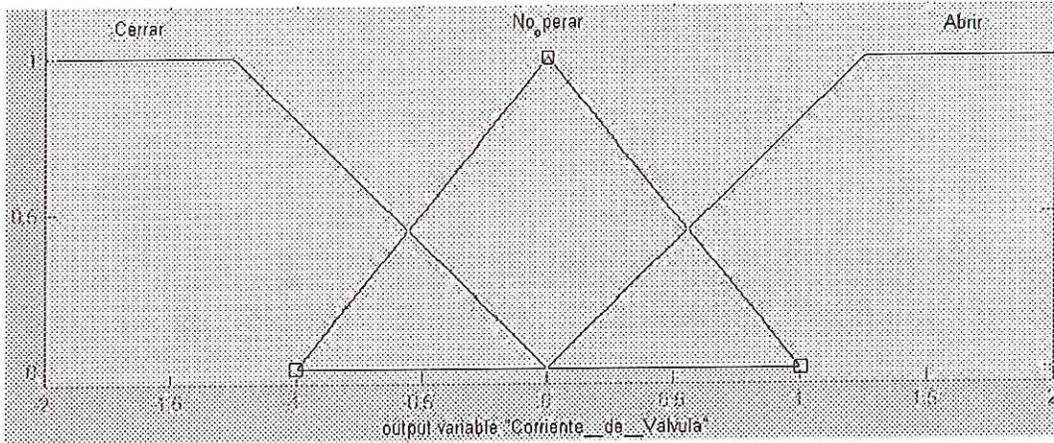


Figura 93 Conjunto difusos de la corriente de salida

Para la variable de salida, tenemos un universo de discurso, de -2 a 2 mv, pues de esta forma obtenemos un aumento o una disminución de forma lenta y progresiva en la corriente que se le envía al actuador.

Posterior a esto se procede a ingresar la matriz de reglas. Esta matriz es la siguiente:

Error \ Δ Error	Negativo	Zero	Positivo
Negativo	Abrir	Abrir	No operar
Zero	Abrir	No operar	Cerrar
Positivo	No operar	Cerrar	Cerrar

Una vez están planteadas las reglas, se procedió, a la simulación del comportamiento del controlador, y la verificación del adecuado funcionamiento de las reglas

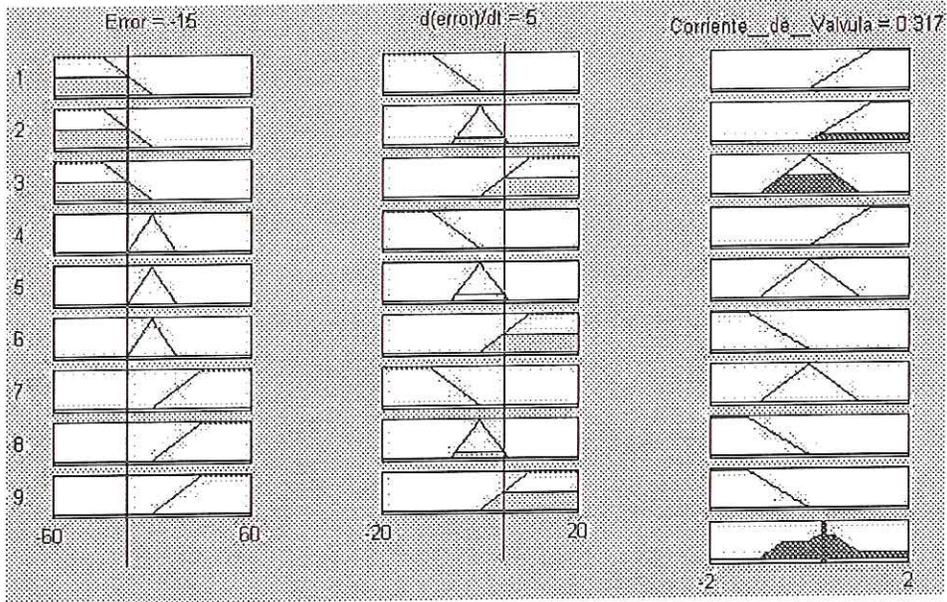


Figura 94 Respuesta del controlador difuso para Error = -15 y Δ Error =5

En este punto de trabajo, con un error negativo y un cambio del error positivo, observamos una respuesta del controlador positivo, que abre la válvula y aumenta la cantidad de vapor, lo cual ocasiona un aumento en la temperatura. También, podemos ver, que la corriente es bajita, pues según las entradas, el controlador determina que a pesar que el error es grande, por su pendiente (cambio del error), se encuentra por buen camino, y no debe aumentar tanto la corriente para evita el sobreimpulso.

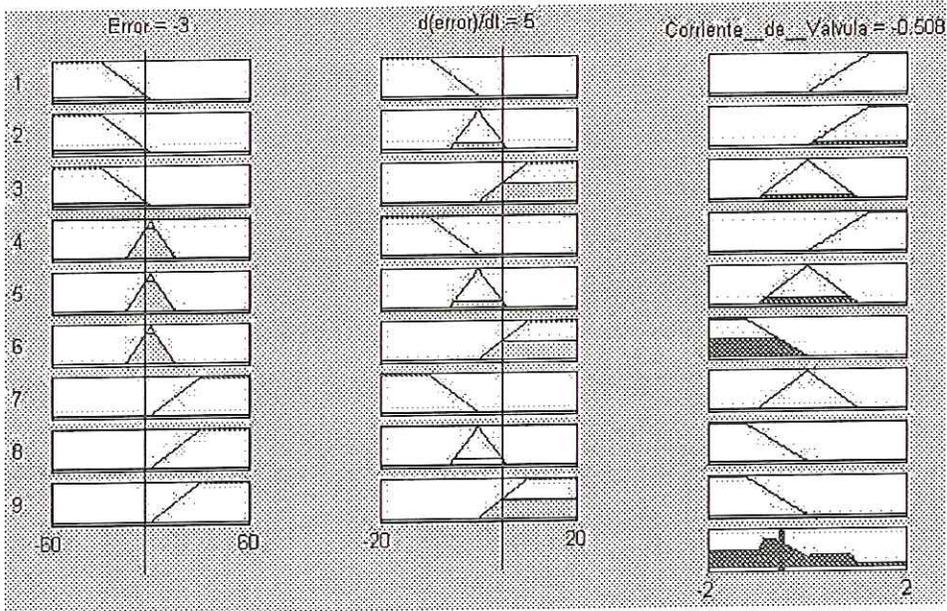


Figura 95. Respuesta del controlador difuso para Error = -3 y Δ Error =5

En este punto de trabajo, (figura 94), observamos que a pesar de que su error es negativo, y su cambio del error es positivo, por el contrario al ejemplo anterior, la respuesta del controlador es un corriente negativa. Esto se produce debido a que el error esta en un valor mínimo, y por la pendiente positiva del error, el controlador, disminuye la corriente un poco, para evitar el sobreimpulso que puede presentarse si se aumenta la corriente.

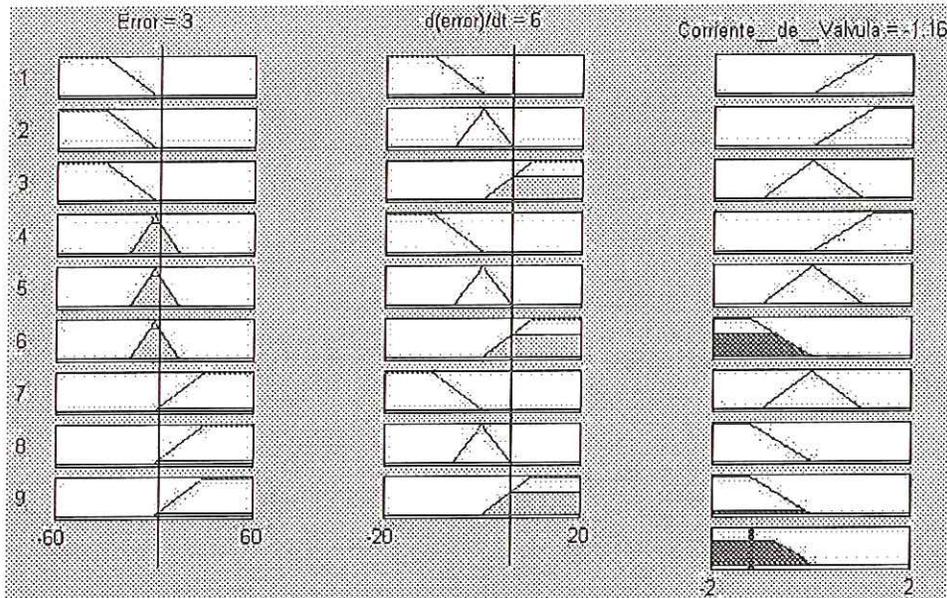


Figura 96. Respuesta del controlador difuso para Error = 3 y Δ Error = 6

En este punto de trabajo (Figura 95), el error y el cambio del error son positivos, lo que indica que la temperatura de salida del intercambiador, ya se paso de la temperatura de consigan, y sigue aumentando, por lo cual el controlador debe cerrar la válvula de vapor para disminuir la temperatura.

Por su parte en la figura 96, observamos un punto de trabajo de error positivo y cambio del error negativo, lo que le indica al controlador, que el sistema va por buen camino, y que debe enviar una mínima corriente, para evitar la oscilación del mismo.

Mediante esta simulación se puede observar que el controlador esta trabajando adecuadamente, en cuanto a la aplicación de las reglas se refiere. El siguiente paso es el elaborar la aplicación en ambiente labwindows, y aplicar el controlador directamente sobre el sistema, en donde podemos sintonizarlo y adecuarlo para un mejor y óptimo comportamiento del mismo.

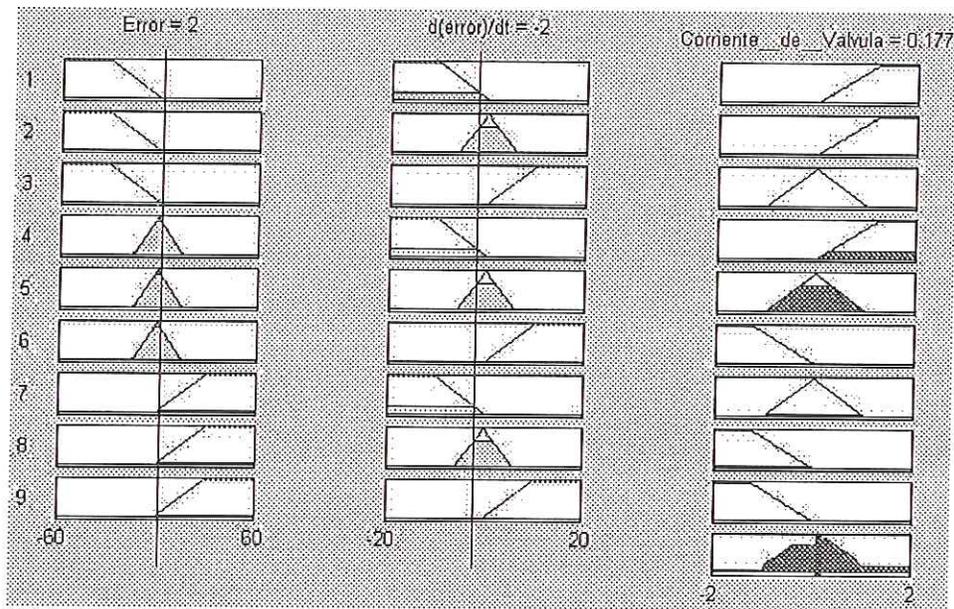


Figura 97. Respuesta del controlador difuso para Error = 2 y Δ Error = -2

7.5 DIAGRAMA DE BLOQUES

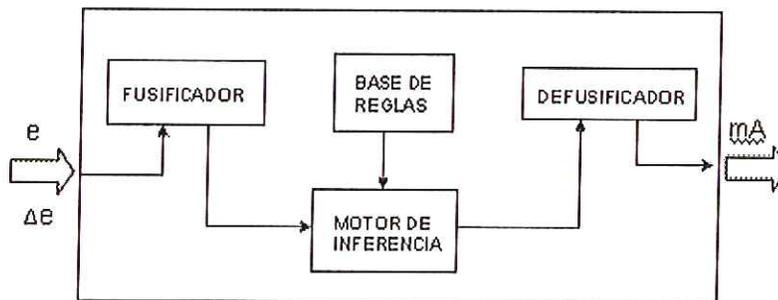


Figura 98. Diagrama de bloques del controlador difuso

Este diagrama de bloques es exactamente igual, para ambos controladores, tanto para el de control de temperatura, como para el de control de caudal.

Este controlador, tiene un primer bloque "FUZZIFICADOR", que transforma las variables de entrada, en sus respectivos valores difusos definidos por las etiquetas de los conjuntos difusos a los que pertenecen y su correspondiente grado de pertenencia. El próximo bloque "MOTOR DE INFERENCIA", selecciona de entre la base de reglas aquellas que son verdaderas para los valores difusos calculados en el bloque anterior. También calcula en qué grado influirá cada una de ellas, en la decisión tomada.

Por último, el bloque "DEFUZZIFICADOR", devuelve una conclusión numérica, como consecuencia de aplicar a los conjuntos difusos de la variable de salida

las conclusiones difusas con su respectivo grado de pertenencia, obtenidas en el bloque anterior.

FUZZIFICADO

El bloque fuzzificador recibe las múltiples entradas concretas que llegan al Sistema de Lógica Difusa (error y Δ error), y produce un Conjunto Difuso por cada una de ellas. Cada Conjunto Difuso producido por este bloque está definido sobre el Universo de Discurso de la Variable Lingüística respectiva, está centrado en el valor concreto de entrada, y tiene una función de pertenencia cuya forma puede ser distinta para cada variable de entrada.

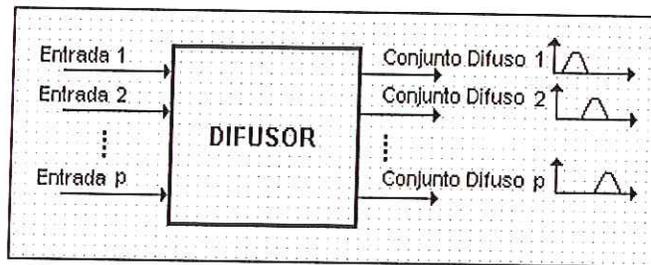


Figura 99. Bloque Difuso del controlador borroso

La definición de variables consiste en establecer los rangos (universo de discurso) de cada una de las variables de entrada y salida en unidades de ingeniería, además de definir el número de funciones de membresía o conjuntos difusos de las mismas.

No existe una regla para definir el número de funciones de membresía, sólo la experiencia y el análisis de la respuesta de control deseada darán la pauta para esta elección.

Se utilizan las variables de error y cambio del error en el tiempo, como señales de entrada obvias que tienen que ver con el comportamiento transitorio y la estabilidad del sistema.

Tabla 11 Variables lingüísticas de entrada para el control de caudal

Variable	Etiqueta	Tipo	Universo de Discurso	Unidades de ingeniería	No.de FM
Señal de error	error	Entrada	-40 a 40	Lts/min	3
Cambio del error	Δ error	Entrada	-20 a 20	Lts/min	10

Tabla 12 Variables lingüísticas de entrada para el control de temperatura

Variable	Etiqueta	Tipo	Universo de Discurso	Unidades de ingeniería	No.de FM
Señal de error	error	Entrada	-60 a 60	°C	3
Cambio del error	Δ error	Entrada	-20 a 20	°C	10

Utilizamos funciones de membresía tipo L y triangulares, para las variables de entrada, tanto en el control de caudal como en el de temperatura.

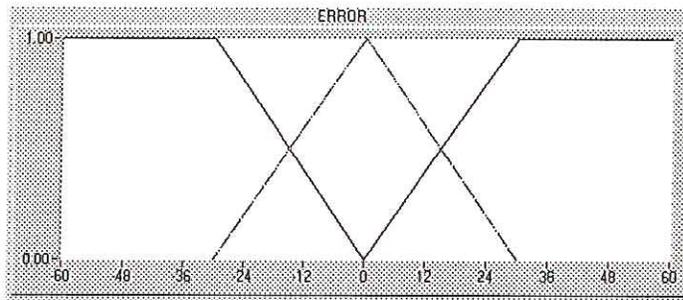


Figura 100. Funciones De Membresía De Las variables de entrada

Para las entradas, error y cambio del error en el tiempo, se utilizaron los siguientes subconjuntos o etiquetas lingüísticas, NEGATIVO (Rojo), CERO (Verde) Y POSITIVO (Azul). Esta en el control de caudal y en el control de temperatura.

NEGATIVO	↕ 40.00	↕ 20.00	↕ 0.00
CERO	↕ 2.50	↕ 0.00	↕ 2.50
POSITIVO	↕ 0.00	↕ 20.00	↕ 40.00

Figura 101. Etiquetas Lingüísticas De Las Variables De Entrada

La fuzzificación se hace mediante el fusificador singleton: que es el método de fuzzificación más utilizado, principalmente en sistemas de control, y consiste en considerar los propios valores discretos como conjuntos difusos. De otra forma, para cada valor de entrada x se define un conjunto A' que los soporta, con función de pertenencia $\mu_{A'}(x')$, de modo que $\mu_{A'}(x) = 1$, ($x' = x$), y $\mu_{A'}(x') = 0$, para todos los otros $x' \in U$ en los que x' es diferente de x .

BASE DE REGLAS.

La base de reglas es un conjunto de m reglas, cada una de las cuales es de la forma:

IF (Antecedente) and (Antecedente) THEN (Consecuente).

Si las reglas cubren todas las posibles combinaciones de Valores lingüísticos de los Antecedentes, se dice que la Base de Reglas es Completa.

Las reglas que se utilizan son de tipo MAMDAMI, y es del modo MODUS PONENS GENERALIZADO:

EL GMP se conoce como razonamiento directo y puede resumirse de la siguiente forma:

(Conocimiento)	Si x es A Entonces y es B
(Hecho)	x es A`
(Consecuencia)	y es B`

Donde A, A`, B y B` son conjuntos difusos.

Para nuestro caso tenemos la base de reglas completa y de la siguiente forma.

Control de temperatura

REGLA
1. If [error is NEG] and [Δ error is NEG] then [Corriente is ABRIR]
2. If [error is NEG] and [Δ error is ZERO] then [Corriente is ABRIR]
3. If [error is NEG] and [Δ error is POST] then [Corriente is NO OPERA]
4. If [error is ZERO] and [Δ error is NEG] then [Corriente is ABRIR]
5. If [error is ZERO] and [Δ error is ZERO] then [Corriente is NO OPERA]
6. If [error is ZERO] and [Δ error is POST] then [Corriente is CERRAR]
7. If [error is POST] and [Δ error is NEG] then [Corriente is NO OPERA]
8. If [error is POST] and [Δ error is ZERO] then [Corriente is CERRAR]
9. If [error is POST] and [Δ error is POST] then [Corriente is CERRAR]

Control De Caudal

REGLA
1. If [error is NEG] and [Δ error is NEG] then [Corriente is CERRAR]
2. If [error is NEG] and [Δ error is ZERO] then [Corriente is CERRAR]
3. If [error is NEG] and [Δ error is POST] then [Corriente is NO OPERA]
4. If [error is ZERO] and [Δ error is NEG] then [Corriente is CERRAR]
5. If [error is ZERO] and [Δ error is ZERO] then [Corriente is NO OPERA]
6. If [error is ZERO] and [Δ error is POST] then [Corriente is ABRIR]
7. If [error is POST] and [Δ error is NEG] then [Corriente is NO OPERA]
8. If [error is POST] and [Δ error is ZERO] then [Corriente is ABRIR]
9. If [error is POST] and [Δ error is POST] then [Corriente is ABRIR]

Motor de Inferencia

El Motor de Inferencia recibe los p conjuntos difusos producidos por el Difusor, y los aplica a cada una de las m reglas de la Base de Reglas, para producir $m \cdot q$ Conjuntos Difusos (un conjunto difuso por cada variable de salida en cada una de las reglas) definidos sobre los Universos de Discurso de la Variables Lingüísticas de salida.

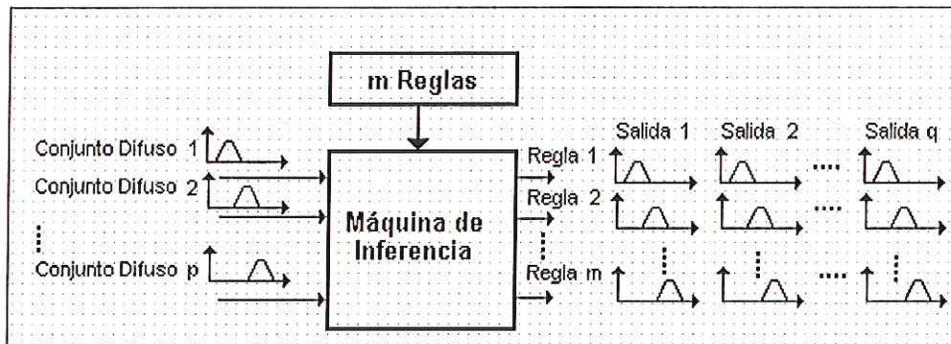


Figura 102. Bloque de maquina de inferencia del controlador difuzo

Las funciones de membresía o pertenencia de los conjuntos de salida son de igual forma tipo L y triangulares, tanto en el control de caudal como en el de temperatura.

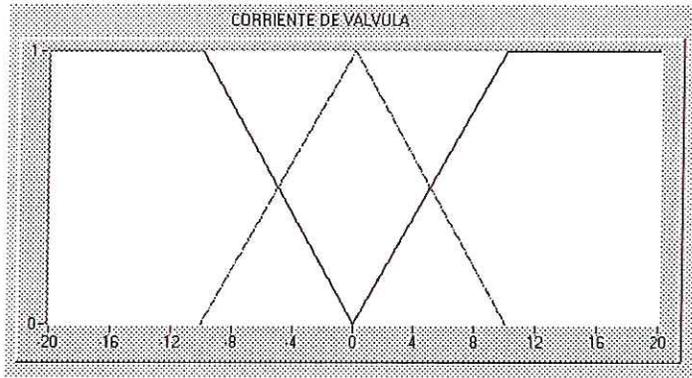


Figura 103. Funciones de Membresía de la variable de salida

Para la salida, se utilizó los siguientes subconjuntos o etiquetas lingüísticas, CERRAR (Rojo), NO OPERAR (Verde) Y ABRIR (Azul). Esta es en el control de caudal y en el control de temperatura.

CORRIENTE VALVULA DE CAUDAL			
CERRAR	↕ -2.00	↕ -1.25	↕ 0.00
NO OPERAR	↕ -0.10	↕ 0.00	↕ 0.10
ABRIR	↕ 0.00	↕ 1.25	↕ 2.00

Figura 104. Etiquetas lingüísticas de la variable de salida

Entonces el motor de inferencia realiza las siguientes operaciones

- Implicación borrosa por la regla del mínimo:

$$\mu_{A \rightarrow B}(x, y) = \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]$$

Esta es la forma en que se define la función de pertenencia de cada uno de los $m \cdot q$ Conjuntos Difusos producidos.

- La agregación difusa o inferencia por el método de la Raíz de la suma de los cuadrados (Root Sum Square).

$$\sqrt{\sum \min[\mu_A(x), \mu_B(y)]^2}$$

Defuzzificador

El bloque de concreción o defuzzificación recibe los $m \cdot q$ Conjuntos Difusos generados por el motor de Inferencia, y produce q valores concretos correspondientes a cada una de las Variables de Salida del Sistema.

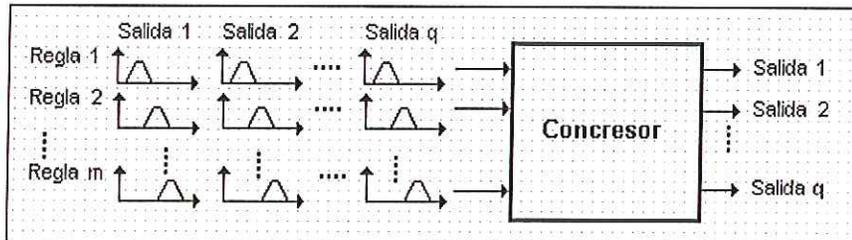


Figura 105. Bloque Defuzzificador del controlador difuso

En general, para producir cada uno de los q valores concretos, el defusificador toma los m Conjuntos Difusos correspondientes a cada Variable de Salida, y mediante el algoritmo de media de centros produce un valor concreto.

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-l} (\mu_{B'}(y^{-l}))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B'}(y^{-l}))}$$

donde y^{-l} representa el centro del conjunto difuso G_l (definido como el punto V en el que $\mu_{G_l}(y)$ alcanza su valor máximo), y $\mu_{B'}(y)$ esta definido como los grados de pertenencia resultantes de la inferencia difusa.

La variable de salida que se utiliza es:

Variable	Etiqueta	Tipo	Universo de Discurso	Unidades de ingeniería	No.de FM
Corriente	Corriente	Salida	-2 a 2	mA	3

Este valor concreto que resulta del controlador difuso, es sumado o restado a la última corriente recibida por la válvula, de tal forma que esta se cierre o se abra, de acuerdo a las necesidades del sistema.

7.4 SINTONIZACION DEL CONTROLADOR DIFUSO

La sintonización de los controladores difusos se realiza mediante la correcta asignación o la modificación de dos de las características más importantes dentro del controlador.

1. LA MATRIZ DE REGLAS

Estas reglas se definen de acuerdo al conocimiento de un experto en el sistema a controlar o de acuerdo a las características del comportamiento del sistema. Se modifican o los antecedentes o las consecuencias.

2. EL TAMAÑO DE LOS CONJUNTOS DIFUSOS

El tamaño de los conjuntos difusos, se modifican de acuerdo a los resultados que se van obteniendo, mediante unas pruebas preliminares del sistema. De igual forma se le pueden agregar mas funciones de membresía. Para alcanzar la sintonización del controlador difuso, se realizaron los siguientes pasos:

1. Se escogieron valores de set point fijos para todas las pruebas
2. A medida que se iban realizando las pruebas con un determinado set point se mutaban los valores de los conjuntos difusos, es decir los valores de los puntos extremos y medios, y de los shoulders (para el caso de los conjuntos tipo L), esto se hacia para cada uno de los conjuntos de entrada, como para el de salida.
3. Luego de haber realizado todas las pruebas, se analizo el comportamiento de las respuestas obtenidas con cada set point, y obviamente con cada uno de los cambios realizados sobre los conjuntos difusos, de esta forma se llego a la conclusión de que los mejores conjuntos borrosos son:

Para el control de Caudal:

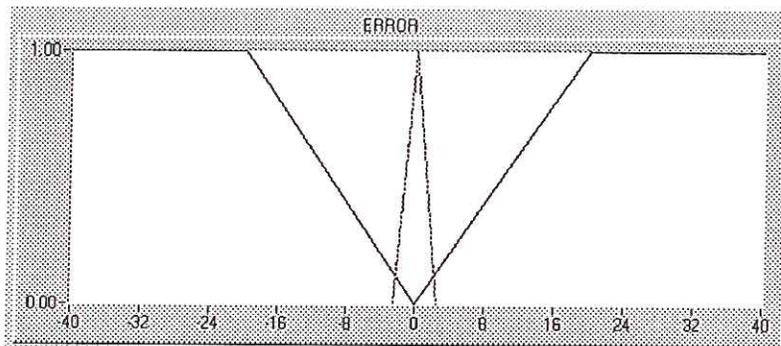


Figura 106. Conjuntos Seleccionados para la Variable Error

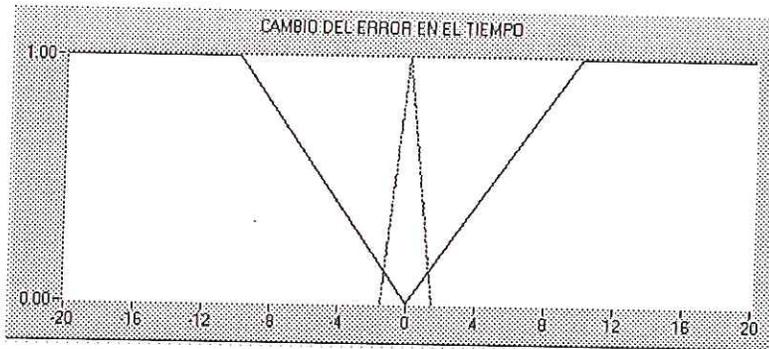


Figura 107. Conjuntos Seleccionados para la Variable Derivada del Error

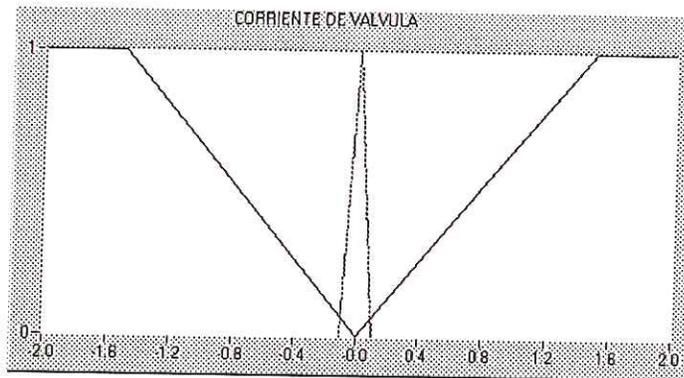


Figura 108. Conjuntos Seleccionados para la Variable de Salida

CONJUNTOS DIFUSOS DEL CAUDAL			
ERROR			
NEGATIVO	↔-40.00	↔-20.00	↔0.00
ZERO	↔-2.50	↔0.00	↔2.50
POSITIVO	↔0.00	↔20.00	↔40.00
CAMBIO DEL ERROR			
NEGATIVO	↔-20.00	↔-10.00	↔0.00
ZERO	↔-1.50	↔0.00	↔1.50
POSITIVO	↔0.00	↔10.00	↔20.00
CORRIENTE VALVULA DE CAUDAL			
CERRAR	↔2.00	↔1.25	↔0.00
NO OPERAR	↔-0.10	↔0.00	↔0.10
ABRIR	↔0.00	↔1.25	↔2.00

Figura 109. Conjuntos Difusos de Caudal

Para el control de Temperatura:

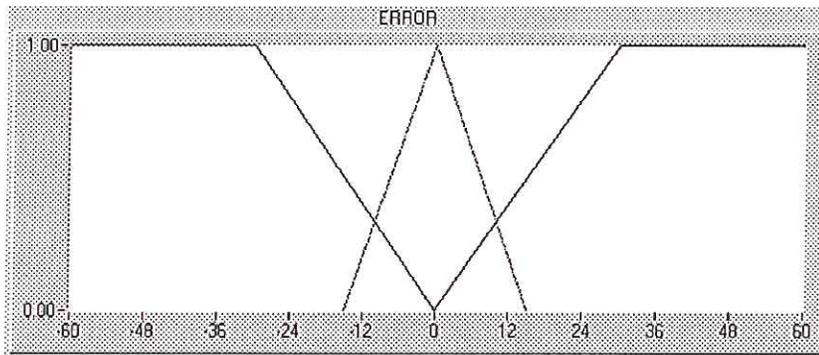


Figura 110. Conjuntos Seleccionados para el Error

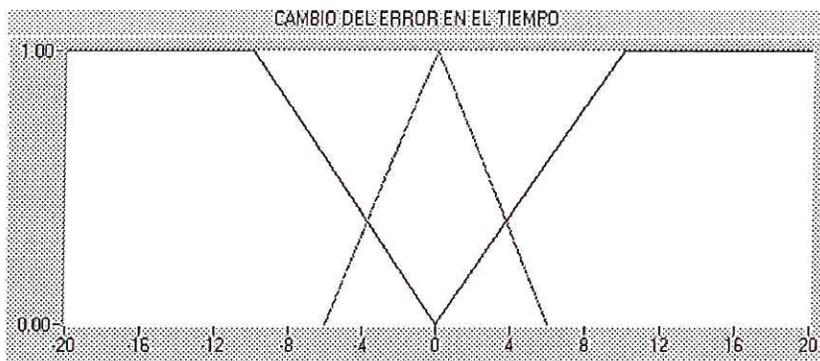


Figura 111. Conjuntos Seleccionados para el Cambio del Error

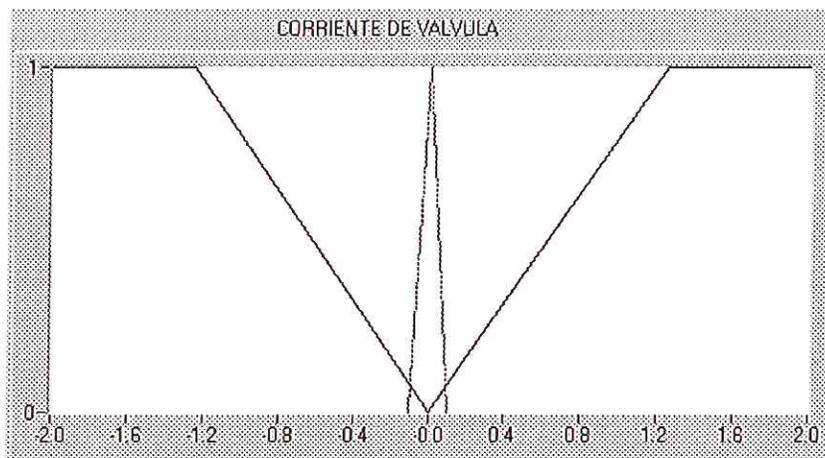


Figura 112. Conjuntos Seleccionados para la Variable de Salida

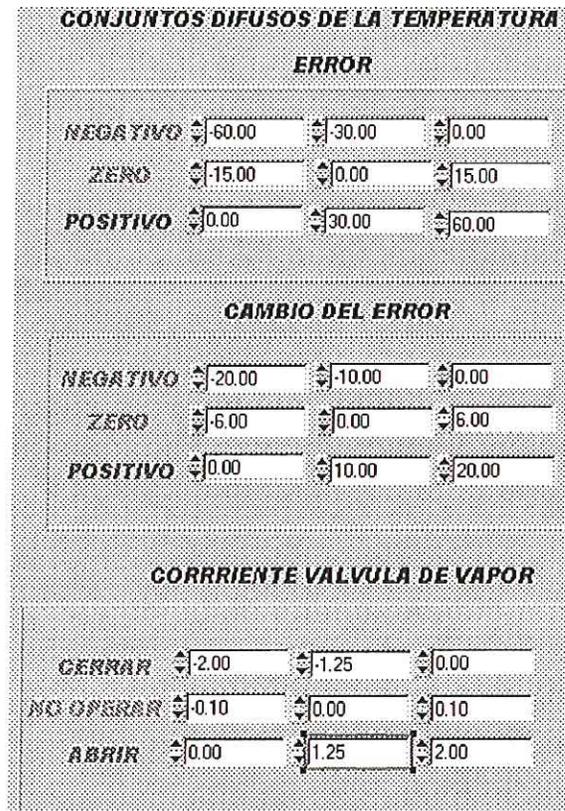


Figura 113. Conjuntos Difusos para la Temperatura

Las gráficas de los resultados de las diferentes pruebas realizadas, se pueden observar en los anexos de este trabajo.

Es muy importante resaltar que el método de defuzzificación base para lograr esta sintonización, fue el de la media de centros, designado por numerosos estudios como uno de los mas eficaces a la hora de realizar control difuso.

7.5 SUBROUTINAS DEL CONTROLADOR

Para la programación del controlador difuso, se diseñaron subrutinas, encargadas de realizar cada uno de los bloques que lo conforman. A continuación se mostrará cada una de ellas.

La primera subrutina, es la del bloque fuzzificador. Esta subrutina, tiene varias funciones, encargadas de realizar la labor correspondiente a la identificación de los conjuntos de las variables de entrada y su respectivo valor difuso y grado de pertenencia.

La primera, a función determinar conjunto, es la encargada de determinar, el o los conjuntos en los cuales los valores de las variables de entrada están ubicadas; esta subrutina se utiliza en los dos controles.

```

void determinarconjunto (float set,float a,float b,float
                        c,float d,float e,float f)
{
if ((set > a) && (set < b))
    { errorneg = 1;
      if (set > c)
          { errorzero = 1;
            if (set > e)
                {errorpost =1;}
              else
                {errorpost = 0;}
            }
          else
            {errorzero = 0;}
        }
    else
    {errorneg=0;}
    if ((set > c) && (set < d))
        { errorzero = 1;
          if (set > e)
              {errorpost =1;}
            else
              {errorpost = 0;}
          }
        else
        {errorzero = 0;}
    if ((set > e) && (set < f))
        {errorpost = 1;}
      else
        {errorpost = 0;}
    if (controltemp)
    {errornegtemp=errorneg;errorzerotemp=errorzero;
    errorposttemp=errorpost;}
}

```

La segunda, la función calpertenencia, que es la encargada de calcular el grado de pertenencia que tienen los valores de las variables de entrada, para cada uno de los conjuntos al que pertenecen.

```

float calpertenencia (int bandera,float set,float a,float
                    b,float c,float d,float e)
{
    if (bandera)
    { if (set < b)
      {
          { pertenenencia= d*(set-b)+1;
            }
          else
          {
              if(set == b)
              {
                  pertenenencia=1;
              }
              else
              { pertenenencia= e*(set-b)+1;}
          }
          return (pertenencia);
        }
      else
      {
          return (0);
        }
    }
}

```

La segunda subrutina, es la del bloque motor de inferencia. Esta subrutina, tiene al igual que la anterior, varias funciones, encargadas de realizar la labor correspondiente a la inferencia de las reglas, y la agregación de los conjuntos resultantes.

```
//IDENTIFICA LAS REGLAS QUE SE ACTIVAN
for (i=1; i<4; i++)
{
    for (j=1; j<4; j++)
    {
        if( vecperterror[i] < vecpertchangerror[j] )
        { newvectorper[z]= vecperterror[i];}
        else
        { newvectorper[z]= vecpertchangerror[j];}
        z=z+1;
    }
}
```

Esta función, es la que determina, que reglas se activan, teniendo en cuenta, que los vectores vecperterror y vecpertchangerror, son vectores que contienen el resultado de las pertenencias de cada una de las entradas, a demás esta es la encargada de inferir las reglas a partir del metodo del minimo.

```
inferenciacerrar= pow(newvectorper[1],2)+pow(newvectorper[2],2)+pow(newvectorper[4],2);
inferenciacerrar= pow(inferenciacerrar,0.5);
inferencianooperar= pow(newvectorper[3],2)+pow(newvectorper[5],2)+pow(newvectorper[7],2);
inferencianooperar= pow(inferencianooperar,0.5);
inferenciaabrir= pow(newvectorper[6],2)+pow(newvectorper[8],2)+pow(newvectorper[9],2);
inferenciaabrir= pow(inferenciaabrir,0.5);
```

La función anterior es la encargada, de realizar el proceso de agregación del resultado de la inferencia, a los conjuntos difusos de salida del controlador.

```
if (clasemetodo == 0)
{
    defuzificado= (corrccerrar2*inferenciacerrar)+(corrncoperar2*inferencianooperar)
                +(corrabrir2*inferenciaabrir);
    defuzificado= defuzificado/(inferenciacerrar+inferencianooperar+inferenciaabrir);
}
```

Esta ultima función hace parte de la subrutina del bloque defuzzificador, es la encargada, de entregar la corriente a la válvula de control.

Estas subrutinas mostradas anteriormente, son las utilizadas en el control de caudal y en el control de temperatura, en los cuales, únicamente cambian los nombres de las variables, de acuerdo al control en el que se este ejecutando.

8. ANÁLISIS COMPARATIVO ENTRE LOS MÉTODOS DE DEFUZZIFICACION IMPLEMENTADOS

Para poder realizar el análisis comparativo entre el comportamiento de los diferentes métodos de defuzzificación implementados en este trabajo, se tomo como base los conjuntos difusos seleccionados para el control de caudal y para el control de temperatura, en el proceso de sintonización de cada uno de estos.

La sintonización del control de caudal y del control de temperatura, se consiguió inicialmente por medio del método de defuzzificación denominado media de centros.

Teniendo en cuenta que el objetivo principal de este trabajo es realizar un estudio del comportamiento de varios métodos de defuzzificación en el control de caudal y temperatura en un intercambiador de calor, se dispuso para realizar la selección de los demás métodos a utilizar.

Los métodos de defuzzificación escogidos fueron cinco en total, estos son conocidos en el área del control por los siguientes nombres:

- Centro de gravedad ponderado por la altura
- Centro de gravedad ponderado por el área
- Media de centros
- Puntos de máximo criterio ponderados por la altura
- Puntos de máximo criterio ponderados por el área

Cuando se hace referencia al control de un sistema, el principal término sobre el cual se hace referencia es a la estabilidad que este pueda brindar, para esto es necesario tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Tiempo que tardara el sistema en estabilizarse
- Margen de error entre el valor de consigna, (V_c), y los valores de estabilización, (V_e), del sistema
- Influencia de la inercia del sistema

Para obtener el tiempo de estabilidad del sistema y los valores en los cuales este se estabiliza se tomaran como limites los valores que se encuentran en el rango determinado por un margen de error del 5%, para poder designar a un valor como punto de estabilidad, el sistema en ese espacio debe mostrar permanencia.

La influencia de la inercia del sistema se estudiara teniendo en cuenta los márgenes de error que se presenten entre el valor de consigna y los valores extremos que se encuentren tanto por encima, como por debajo de este.

Estos serán los aspectos tomados en cuenta para el análisis que se realizara sobre el comportamiento de cada uno de los métodos de defuzzificación implementados tanto para el control de caudal, como para el control de temperatura.

8.1 CONTROL DE CAUDAL

Para el análisis comparativo entre los métodos de defuzzificación en el control de caudal se escogió un set point o valor de consigna de 25 [Lts / min], este es el valor intermedio de la cantidad de caudal que puede llegar al sistema, es decir que el rango de caudal que este puede recibir es de 10 a 40 [Lts / min].

8.1.1 Centro de gravedad ponderado por la altura

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i * w_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Donde: w es el centro de gravedad del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida, y h es la altura del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de caudal utilizando como método de defuzzificación el centro de gravedad ponderado por la altura se muestra en la Figura 114.

Tabla 13. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por la altura, en el control de caudal

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc – Ve)	Influencia de la inercia del sistema
105	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	0.8% por encima del set point 8.4% por debajo del set point

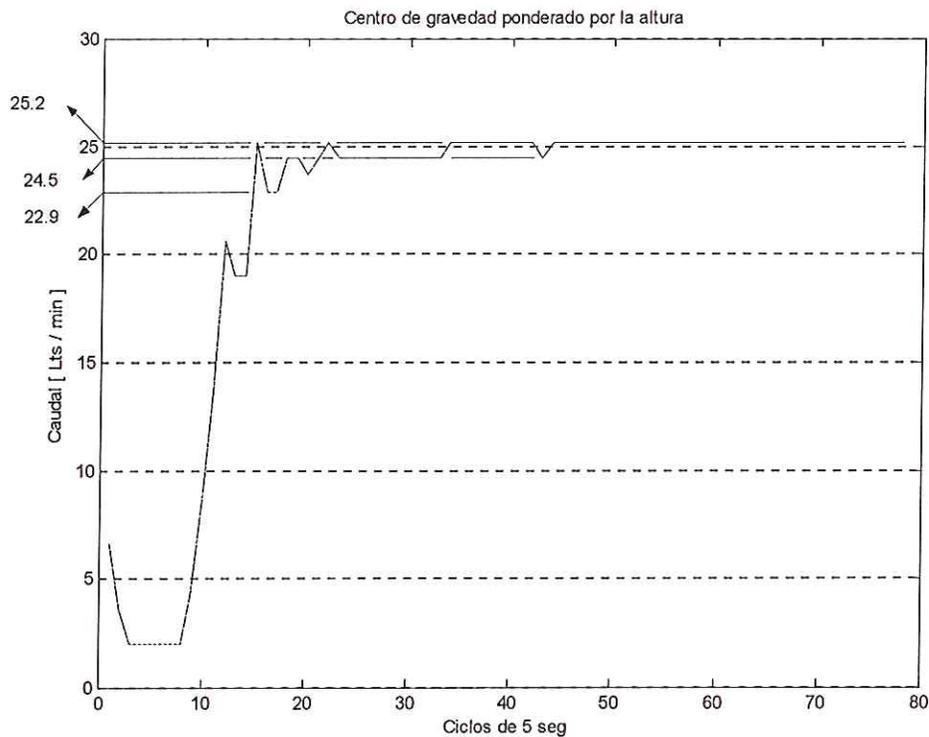


Figura 114. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, centro de gravedad ponderado por la altura

8.1.2 Centro de gravedad ponderado por el área

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$x = \frac{\sum_{i=1}^n s_i * w_i}{\sum_{i=1}^n s_i}$$

Donde: w es el centro de gravedad del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y s es el área del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de caudal utilizando como método de defuzzificación el centro de gravedad ponderado por el área se muestra en la Figura 115.

Tabla 14. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por el área, en el control de caudal

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
125	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	7.2% por encima del set point 5.2% por debajo del set point

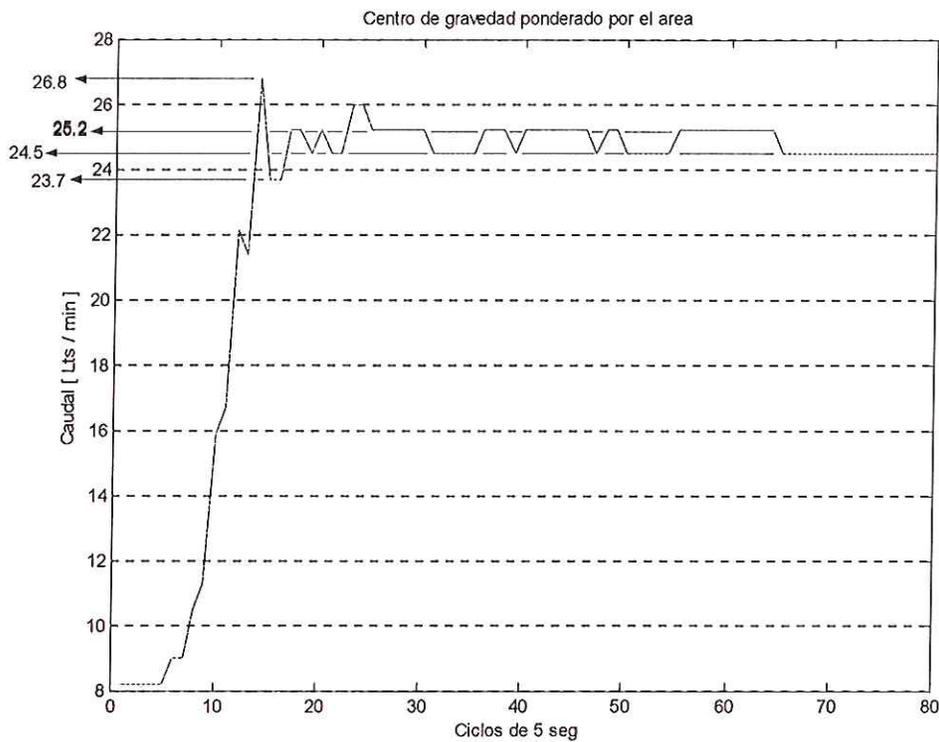


Figura 115. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, centro de gravedad ponderado por el área

8.1.3 Media de centros

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-l} (\mu_{B'}(y^{-l}))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B'}(y^{-l}))}$$

Donde y^1 representa el centro del conjunto difuso G^1 (definido como el punto V en el que $\mu_{G^1}(y)$ alcanza su valor máximo), y $\mu_B(y)$ esta definido como los grados de pertenecia resultantes de la inferencia difusa.

El comportamiento del control difuso de caudal utilizando como método de defuzzificación el denominado media de centros se muestra en la Figura 116.

Tabla 15. Resultados del método de defuzzificación media de centros, en el control de caudal

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
85	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	4% por encima del set point 5.2% por debajo del set point

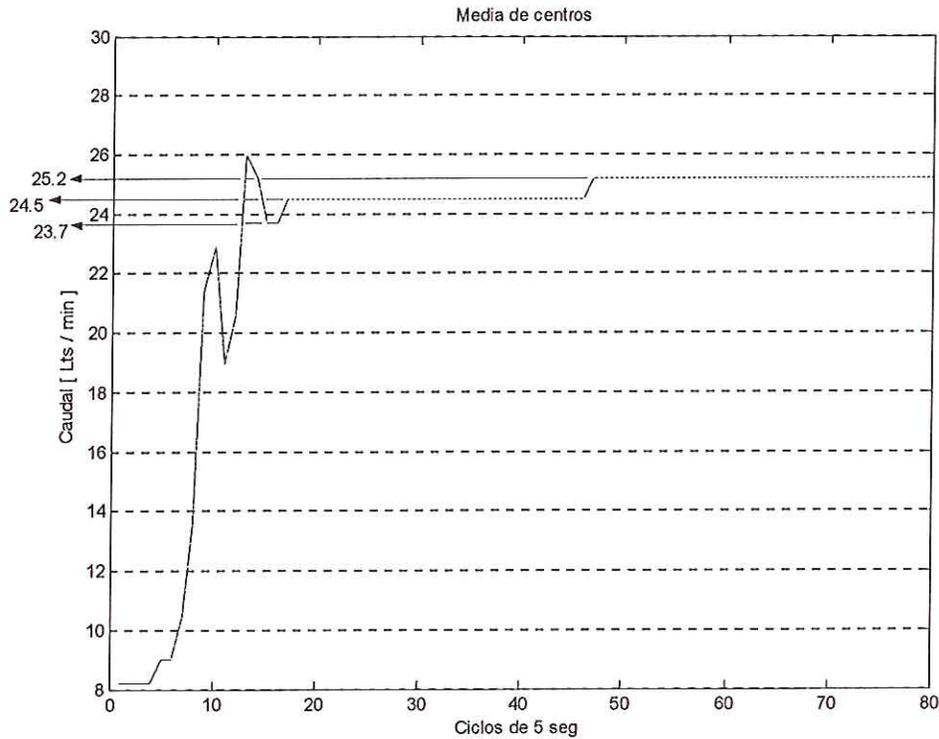


Figura 116. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, media de centros

8.1.4 Puntos de máximo criterio ponderados por la altura

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i * G_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Donde: G es el punto de máximo criterio del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y h es altura del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de caudal utilizando como método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por la altura se muestra en la Figura 117.

Tabla 16. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por la altura, en el control de caudal

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
230	2% por debajo del set point	0.8% por encima del set point 5.2% por debajo del set point

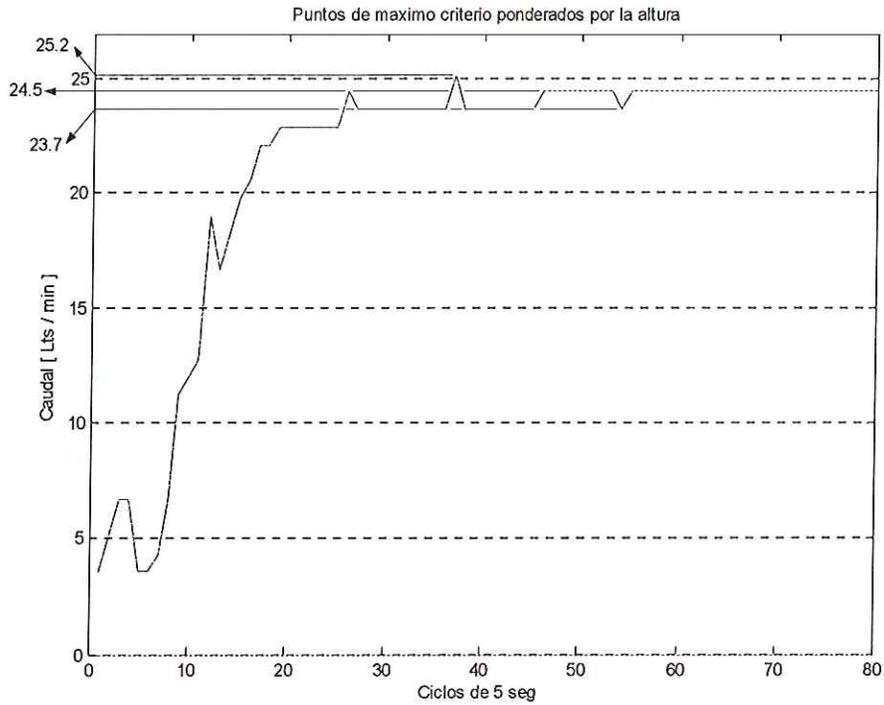


Figura 117. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderado por la altura

8.1.5 Puntos de máximo criterio ponderados por el área

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i * G_i}{\sum_{i=1}^n s_i}$$

Donde: G es el punto de máximo criterio del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y s es el área del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de caudal utilizando como método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por el área se muestra en la Figura 118.

Tabla 17. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por el área, en el control de caudal

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
120	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point

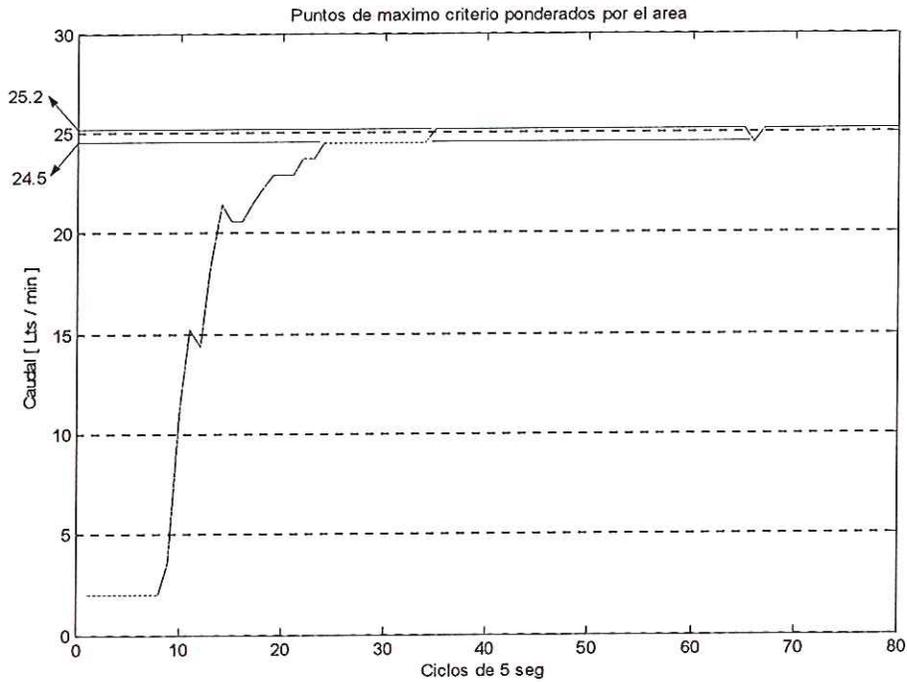


Figura 118. Comportamiento del control difuso de caudal, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderado por el área

Tabla 18. Resultados de los métodos de defuzzificación en control de caudal

Método de defuzzificación	Tiempo de estabilidad [seg]	Margen de error (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
Centro de gravedad ponderado por la altura	105	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	0.8% por encima del set point 8.4% por debajo del set point
Centro de gravedad ponderado por el área	125	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	7.2% por encima del set point 5.2% por debajo del set point

Media de centros	85	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	4% por encima del set point 5.2% por debajo del set point
PMC ponderado por la altura	230	2% por debajo del set point	0.8% por encima del set point 5.2% por debajo del set point
PMC ponderado por la área	120	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point

8.2 CONTROL DE TEMPERATURA

Para el análisis comparativo entre los métodos de defuzzificación en el control de temperatura se escogió un set point o valor de consigna de 40 [°C].

8.2.1 Centro de gravedad ponderado por la altura

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i * w_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Donde: w es el centro de gravedad del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida, y h es la altura del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de temperatura utilizando como método de defuzzificación el centro de gravedad ponderado por la altura se muestra en la Figura 119.

Tabla 19. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por la altura en el control de temperatura

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
670	0.75% por debajo del set point	40.895% por encima del set point 11.575% por debajo del set point

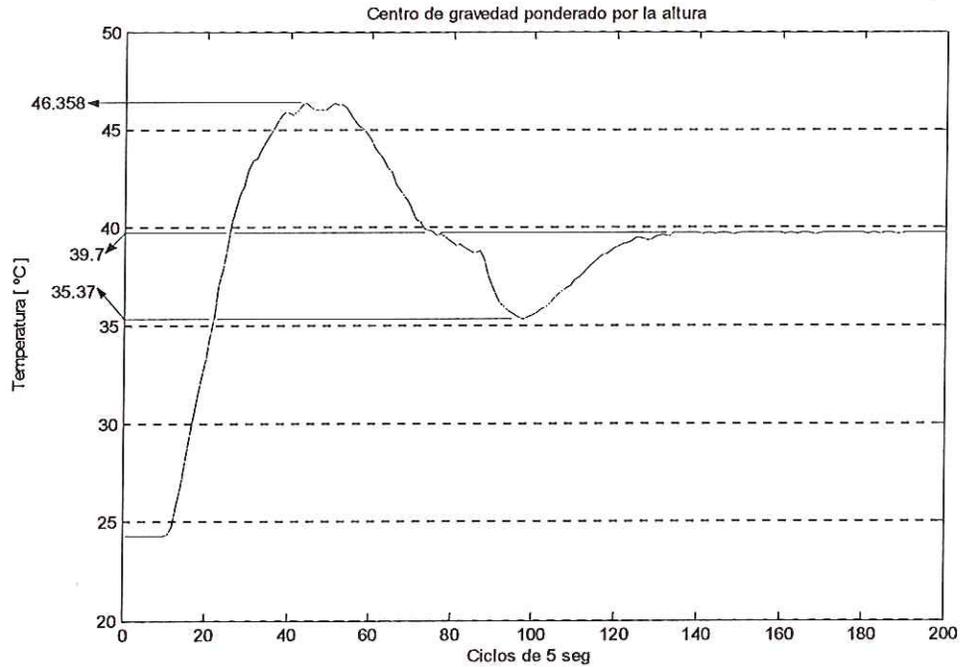


Figura 119. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, centro de gravedad ponderado por la altura

8.2.2 Centro de gravedad ponderado por el área

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n S_i * W_i}{\sum_{i=1}^n S_i}$$

Donde: w es el centro de gravedad del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y s es el área del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de temperatura utilizando como método de defuzzificación el centro de gravedad ponderado por el área se muestra en la Figura 120.

Tabla 20. Resultados del método de defuzzificación centro de gravedad ponderado por el área en el control de temperatura

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
No presento estabilidad	No presento estabilidad	11.25% por encima del set point 14.5325% por debajo del set point

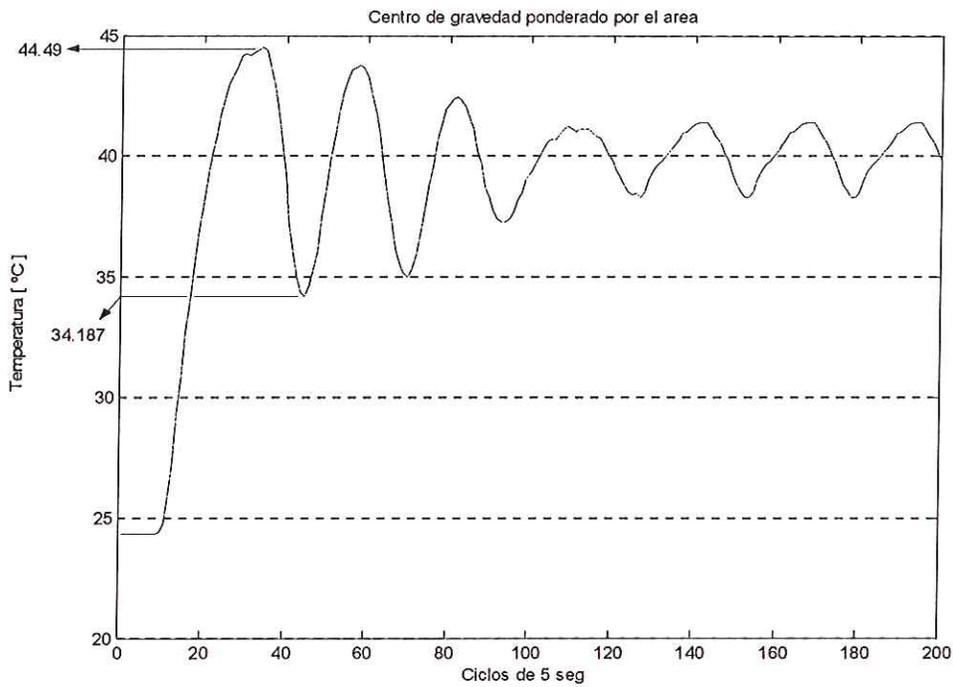


Figura 120. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, centro de gravedad ponderado por el área

8.2.3 Media de centros

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$y = \frac{\sum_{l=1}^M y^{-l} (\mu_{B'}(y^{-l}))}{\sum_{l=1}^M (\mu_{B'}(y^{-l}))}$$

Donde y^{-l} representa el centro del conjunto difuso G^l (definido como el punto V en el que $\mu_{G^l}(y)$ alcanza su valor máximo), y $\mu_{B'}(y)$ esta definido como los grados de pertenencia resultantes de la inferencia difusa.

El comportamiento del control difuso de temperatura utilizando como método de defuzzificación el denominado media de centros se muestra en la Figura 121.

Tabla 21. Resultados del método de defuzzificación media de centros en el control de temperatura

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
710	1% por debajo del set point	10.215% por encima del set point 12.5% por debajo del set point

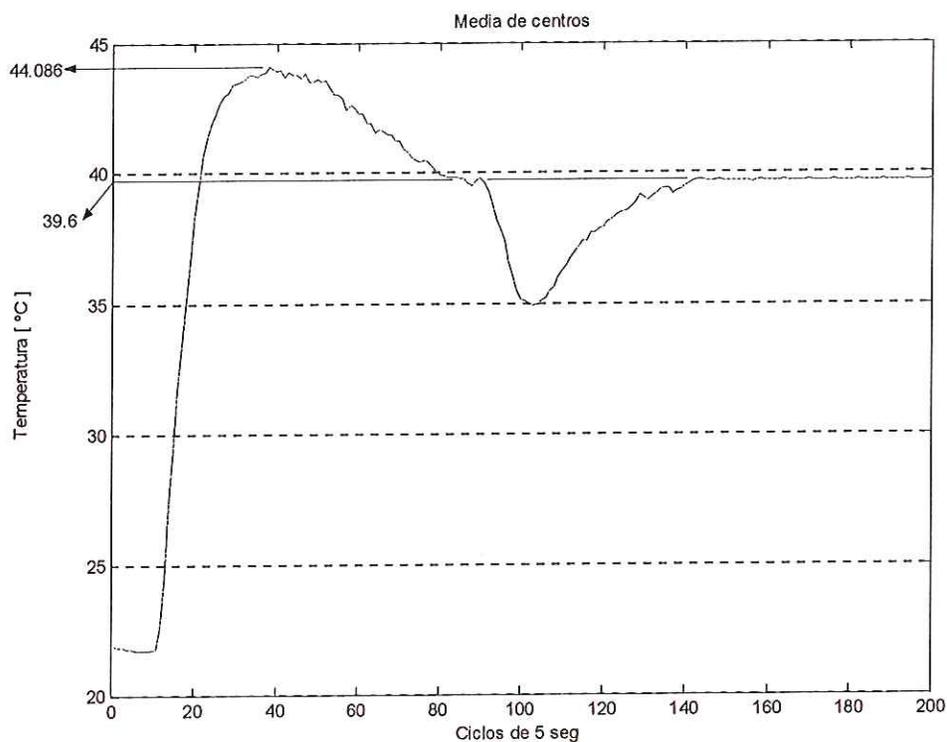


Figura 121. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, media de centros

8.2.4 Puntos de máximo criterio ponderados por la altura

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n h_i * G_i}{\sum_{i=1}^n h_i}$$

Donde: G es el punto de máximo criterio del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y h es altura del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de temperatura utilizando como método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por la altura se muestra en la Figura 122.

Tabla 22. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por la altura en el control de temperatura

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
745	0.75% por debajo del set point	10.525% por encima del set point 3.795% por debajo del set point

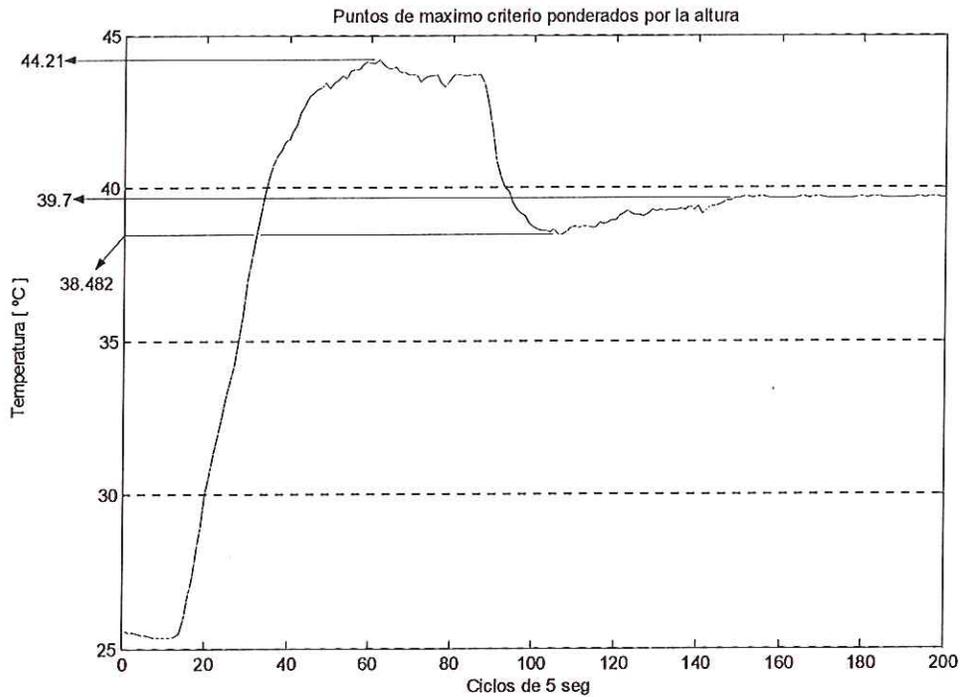


Figura 122. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderados por la altura

8.2.5 Puntos de máximo criterio ponderados por el área

La ecuación que rige este método de defuzzificación es la siguiente:

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n s_i * G_i}{\sum_{i=1}^n s_i}$$

Donde: G es el punto de máximo criterio del conjunto resultante luego de realizar la operación borrosa escogida y s es el área del mismo conjunto.

El comportamiento del control difuso de temperatura utilizando como método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por el área se muestra en la Figura 123.

Tabla 23. Resultados del método de defuzzificación puntos de máximo criterio ponderados por el área en el control de temperatura

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
735	1.38% por debajo del set point	14.805% por encima del set point 10.4075% por debajo del set point

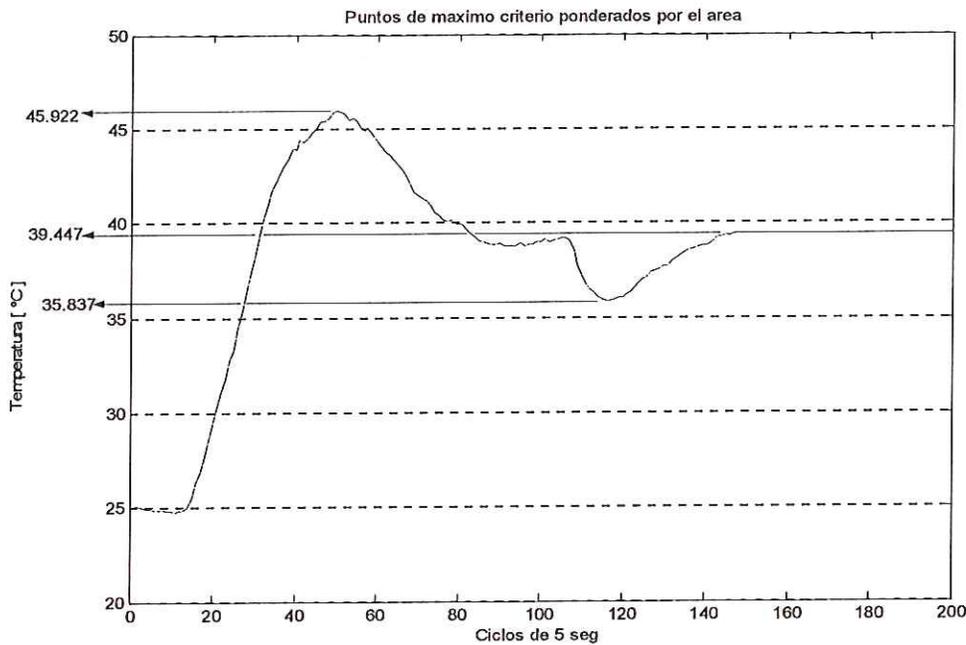


Figura 123. Comportamiento del control difuso de temperatura, bajo la acción del método, puntos de máximo criterio ponderados por el área

Tabla 24. Resultados de los métodos de defuzzificación en control de temperatura

Método de defuzzificación	Tiempo de estabilidad [seg]	Margen de error (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
Centro de gravedad ponderado por la altura	670	0.75% por debajo del set point	40.895% por encima del set point 11.575% por debajo del set point
Centro de gravedad ponderado por el área	No presento estabilidad	No presento estabilidad	11.25% por encima del set point 14.5325% por debajo del set point

Media de centros	710	1% por debajo del set point	10.215% por encima del set point 12.5% por debajo del set point
PMC ponderados por la altura	745	0.75% por debajo del set point	10.525% por encima del set point 3.795% por debajo del set point
PMC ponderados por la área	735	1.38% por debajo del set point	14.805% por encima del set point 10.4075% por debajo del set point

9. ANALISIS COMPARATIVO ENTRE EL CONTROLADOR CLASICO Y EL CONTROLADOR DIFUSO

Para poder realizar este análisis se debe hacer uso de conceptos que sean fundamentales a la hora de evaluar la eficiencia de un controlador. Los conceptos a tomar en cuenta en este caso son:

- Tiempo que tardara el sistema en estabilizarse
- Margen de error entre el valor de consigna, (V_c), y los valores de estabilización, (V_e), del sistema
- Influencia de la inercia del sistema

Para obtener el tiempo de estabilidad del sistema y los valores en los cuales este se estabiliza se tomaran como limites los valores que se encuentran en el rango determinado por un margen de error del 5%, para poder designar a un valor como punto de estabilidad, el sistema en ese espacio debe mostrar permanencia.

La influencia de la inercia del sistema se estudiara teniendo en cuenta los márgenes de error que se presenten entre el valor de consigna y los valores extremos que se encuentren tanto por encima, como por debajo de este.

Las respuestas del controlador difuso seleccionadas para el control de caudal y temperatura, entre los diferentes métodos de defuzzificación, para que sirvan como punto de comparación ante el controlador PID, son las que hacen uso del método de defuzzificación media de centros, el cual se escogió por ser el método con el cual se realizo todo la parte del diseño de este controlador.

Al igual que el controlador difuso, el controlador PID se aplico al control de caudal y al de temperatura, a estos controles se les realizo un proceso de sintonización calculándole a cada uno sus constantes proporcional, integral y derivativa, las respuestas del controlador PID que se van a comparar con el controlador difuso trabajan con dichas constantes.

9.1 CONTROL DE CAUDAL

Para el análisis comparativo entre el controlador difuso y el controlador PID en el control de caudal se hizo uso de las pruebas realizadas a cada uno de estos controladores, con un set point o valor de consigna de 25 [Lts / min].

9.1.1 Controlador difuso

Tabla 25. Análisis de la respuesta obtenida del controlador difuso en el control de caudal

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
85	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	4% por encima del set point 5.2% por debajo del set point

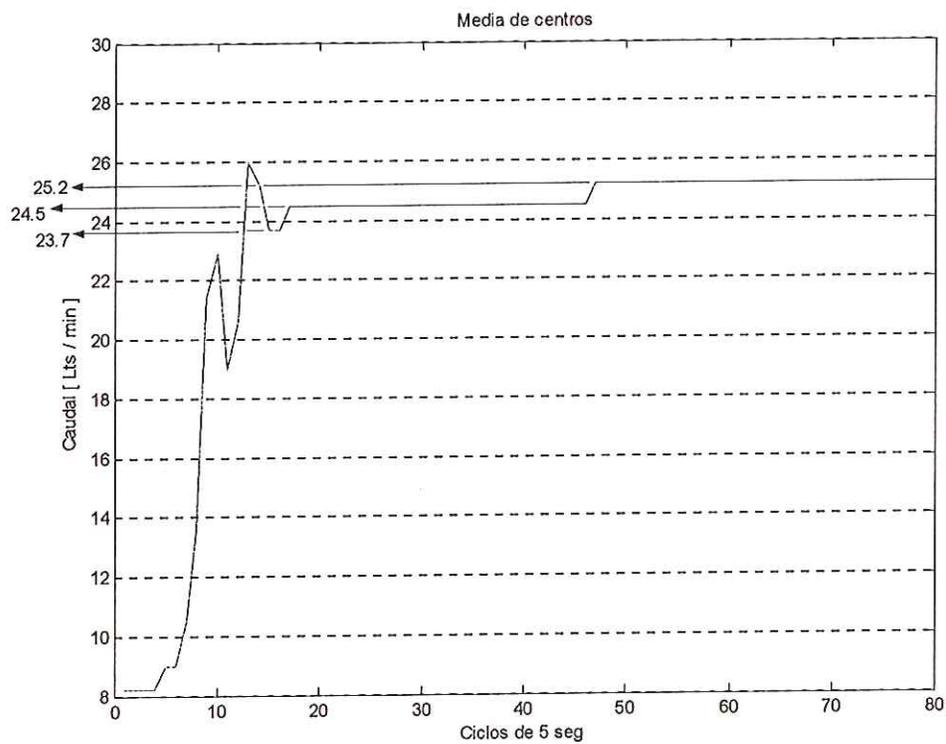


Figura 124. Respuesta del controlador difuso en el control de caudal

9.1.2 Controlador PID

Tabla 26. Análisis de la respuesta obtenida del controlador PID en el control de caudal

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
115	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	22.8% por encima del set point 2% por debajo del set point

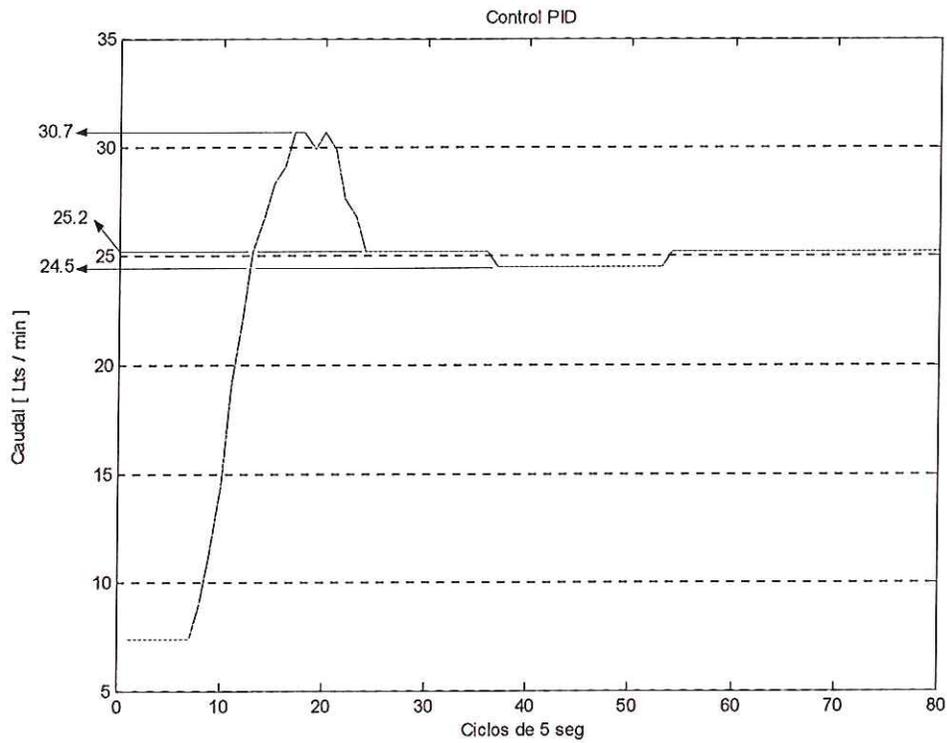


Figura 125. Respuesta del controlador PID en el control de caudal

Tabla 27. Análisis de las respuestas obtenidas del controlador difuso y del controlador PID en el control de caudal

Controlador	Tiempo de estabilidad [seg]	Margen de error (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
Controlador difuso	85	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	4% por encima del set point 5.2% por debajo del set point
Controlador PID	115	0.8% por encima del set point 2% por debajo del set point	22.8% por encima del set point 2% por debajo del set point

9.2 CONTROL DE TEMPERATURA

Para el análisis comparativo entre el controlador difuso y el controlador PID en el control de temperatura se hizo uso de las pruebas realizadas a cada uno de estos controladores, con un set point o valor de consigna de 40 [°C].

9.2.1 Controlador difuso

Tabla 28. Análisis de la respuesta obtenida del controlador difuso en el control de temperatura

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
710	1% por debajo del set point	10.215% por encima del set point 12.5% por debajo del set point

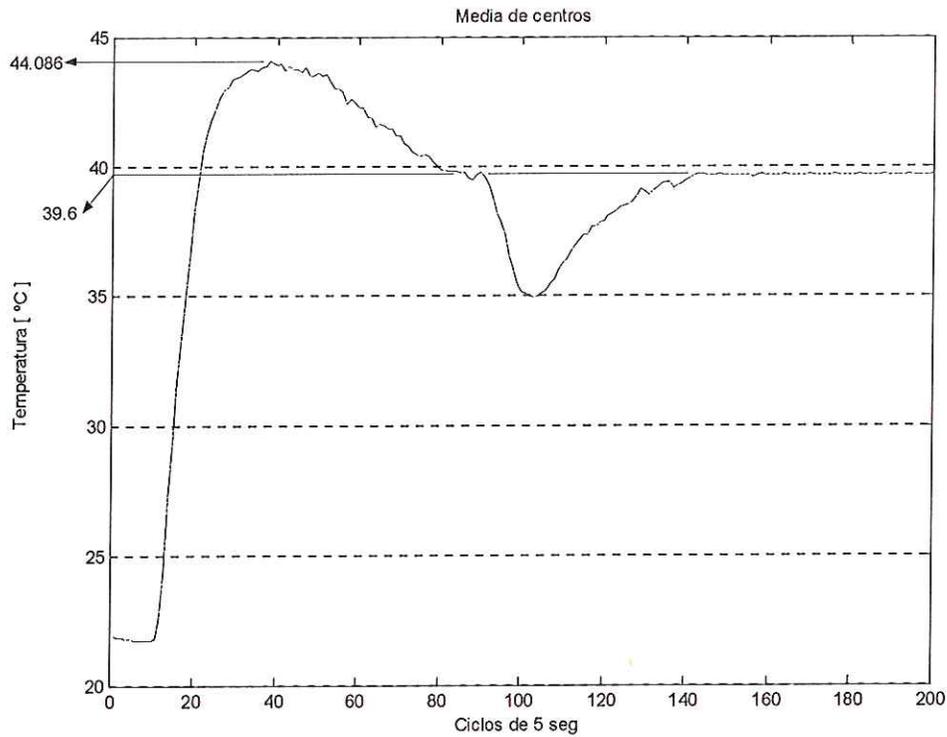


Figura 126. Respuesta del controlador difuso en el control de temperatura

9.2.2 Controlador PID

Tabla 29. Análisis de la respuesta obtenida del controlador PID en el control de temperatura

Tiempo de estabilización [seg]	Margen de error entre (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
505	2.75% por debajo del set point	4.455% por encima del set point 2.75% por debajo del set point

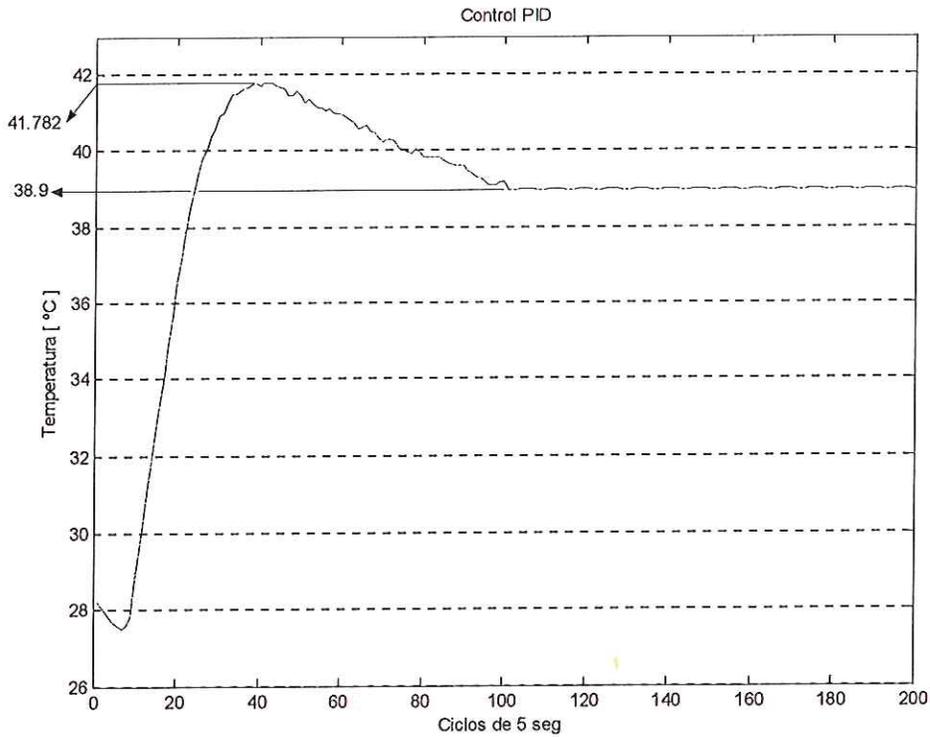


Figura 127. Respuesta del controlador PID en el control de temperatura

Tabla 30. Análisis de las respuestas obtenidas del controlador difuso y del controlador PID en el control de temperatura

Controlador	Tiempo de estabilidad [seg]	Margen de error (Vc - Ve)	Influencia de la inercia del sistema
Controlador difuso	710	1% por debajo del set point	10.215% por encima del set point 12.5% por debajo del set point
Controlador PID	505	2.75% por debajo del set point	4.455% por encima del set point 2.75% por debajo del set point

CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos en este trabajo muestran la viabilidad técnica de la utilización de la lógica difusa en el control de caudal y temperatura a la entrada de corriente de calentamiento de un intercambiador de calor.

Con respecto al control de caudal y temperatura implementando Lógica Difusa, se puede decir que posee las ventajas de no necesitar un modelo matemático preciso del sistema a controlar. Como desventaja se puede decir, que el diseño debe realizarse generalmente con el método de prueba y error.

La implementación de un buen control y la selección correcta de los instrumentos de control, son dos aspectos que van de la mano para poder obtener la estabilidad de un sistema.

Es posible controlar por medio de técnicas difusas cualquier proceso industrial, con la mayor facilidad y con el mínimo de errores, basta con conocer su comportamiento general para estructurar una serie de conjuntos difusos y sus respectivas reglas.

La sintonización del controlador difuso, además de depender de la matriz de reglas, también, depende del tamaño de los conjuntos de la variable, ya se de entrada o de salida. Lo cual depende del mismo comportamiento del sistema.

Para el diseño de un controlador difuso es de vital importancia contar con los conocimientos de un experto en el tipo de sistema a controlar, pues de ello depende el bueno desempeño del dispositivo.

LabWindows/CVI, es un ambiente, que permite desarrollar cualquier tipo de plataforma de visualización, control y registro, de un sistema industrial.

La calibración y rápida adquisición de las señales enviadas por los sensores utilizados en un sistema de control, es de vital importancia, para el desempeño, y estabilidad de cualquier sistema de control.

Para la implementación de un control fuzzy, se hace necesario, el previo establecimiento de los métodos y alternativas a utilizar en cada uno de los bloques que lo conforman. De esta forma se puede obtener mejores resultados, en el momento de la sintonización del sistema.

La respuesta del controlador difuso, no depende del método de defuzzificación utilizado, si no de la adecuada utilización de las funciones de membresía, y de los números de etiquetas lingüísticas utilizada para cada una de las variables de entrada y de salida del sistema. De igual forma depende del tipo y del tamaño de los conjuntos utilizados.

Se logro diseñar un bueno software de control, de uso fácil, muy didáctico y disponible para la aplicación de los dos tipos de control, en el laboratorio de plata piloto de la Universidad Autónoma de Bucaramanga.

Se diseño, instalo, y puso en marcha el sistema de control de caudal y temperatura en dos intercambiadores de calor, uno de cascos y tubos, y el otro de tubos concéntricos, ubicados en el laboratorio de planta pilo de la Universidad autónoma de Bucaramanga.

La utilización de un sistema de adquisición de datos de buen comportamiento, de fácil uso, y de última tecnología, permite satisfactoriamente disminuir los problemas de ruido que se puedan presentar en las señales adquiridas.

BIBLIOGRAFIA

<http://personales.ya.com/universal/termoweb/ingenieriaTermica/teoria>.

<http://www.monografias.com/trabajos11/valvulas/valvus.shtml>.

CREUS SOLE, Antonio. Instrumentación industrial 6 Edición. México: Alfaomega Grupo Editores, 1998.

<http://Kobold.com//MedidoresCaudal>.

DEL BRIO, Bonifacio Martín. SAENZ MOLINA, Alfredo. Redes Neuronales y Sistemas difusos. México: Alfaomega Grupo Editores, 2002.

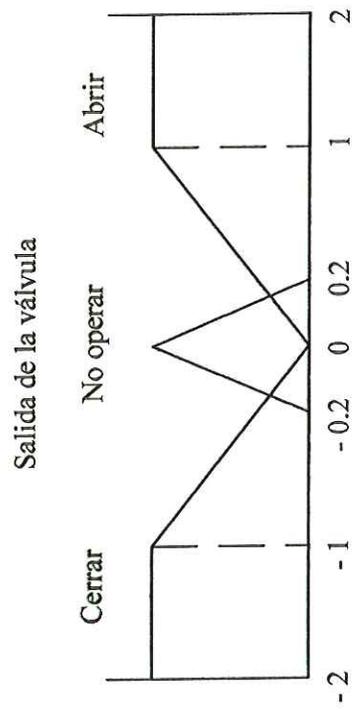
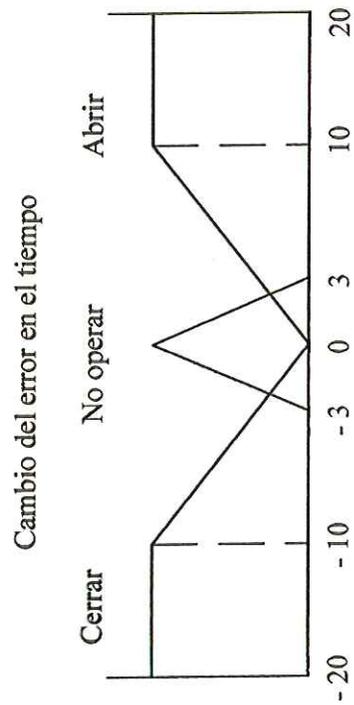
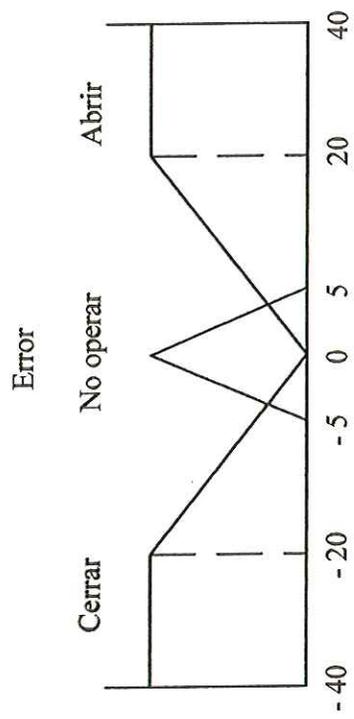
ROCA CUSIDO, Alfred. Control de Procesos 2 Edición. Barcelona: Alfaomega Grupo Editores, 2002.

UMEZ ERONINI, Eronini. Dinámica de sistemas y control. México: Internacional Thomson Editores, 2001.

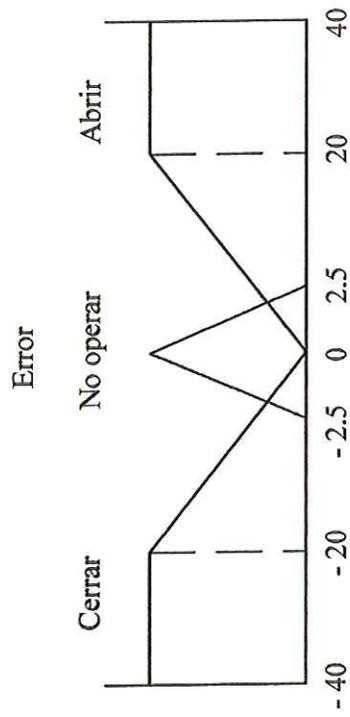
RODRÍGUEZ AVILA, Jesús E. Introducción a la Ingeniería del Control Automatico. México: McGraw-Hill interamericana editores S.A, 1998.

PALLAS ARENY, Ramon. Sensores y Acondicionadores de señal. México: Alfaomega Grupo Editores, 2001.

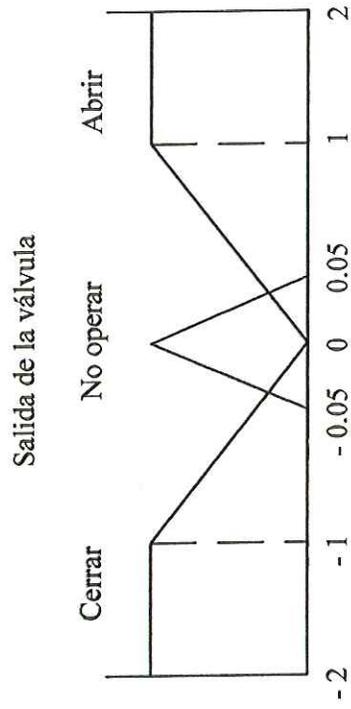
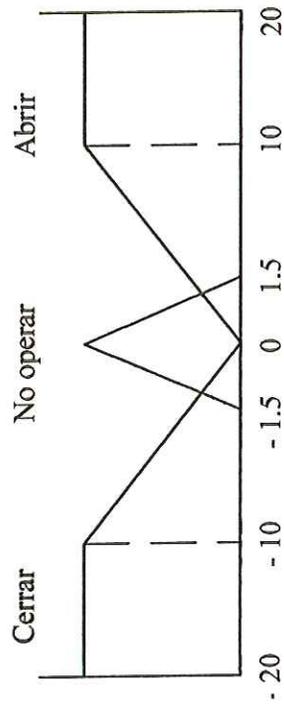
ANEXO 1. PRIMEROS CONJUNTOS BORROSOS ESCOGIDOS PARA LA EXPLICACION DE LA SINTONIZACION DEL CONTROL DIFUSO DE CAUDAL



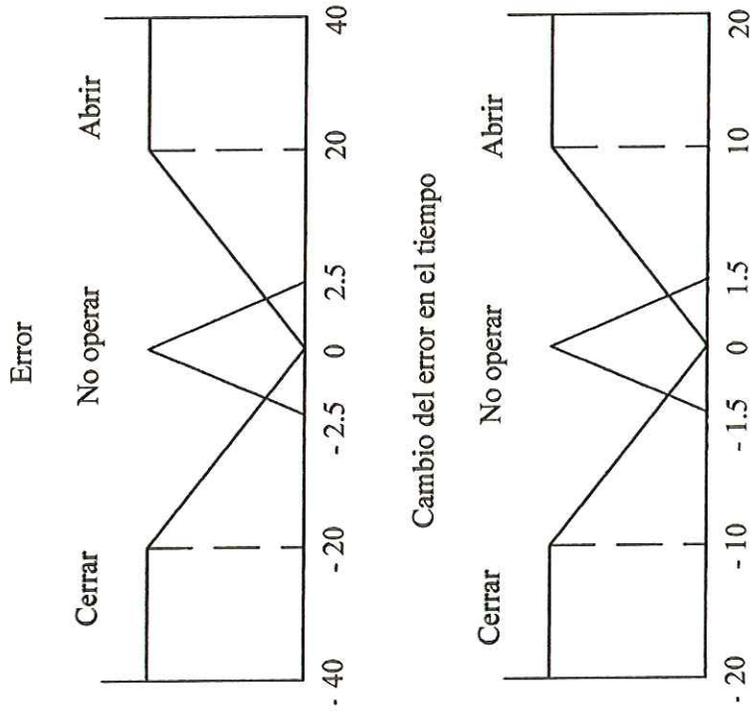
ANEXO 2. SEGUNDOS CONJUNTOS BORROSOS ESCOGIDOS PARA LA EXPLICACION DE LA SINTONIZACION DEL CONTROL DIFUSO DE CAUDAL



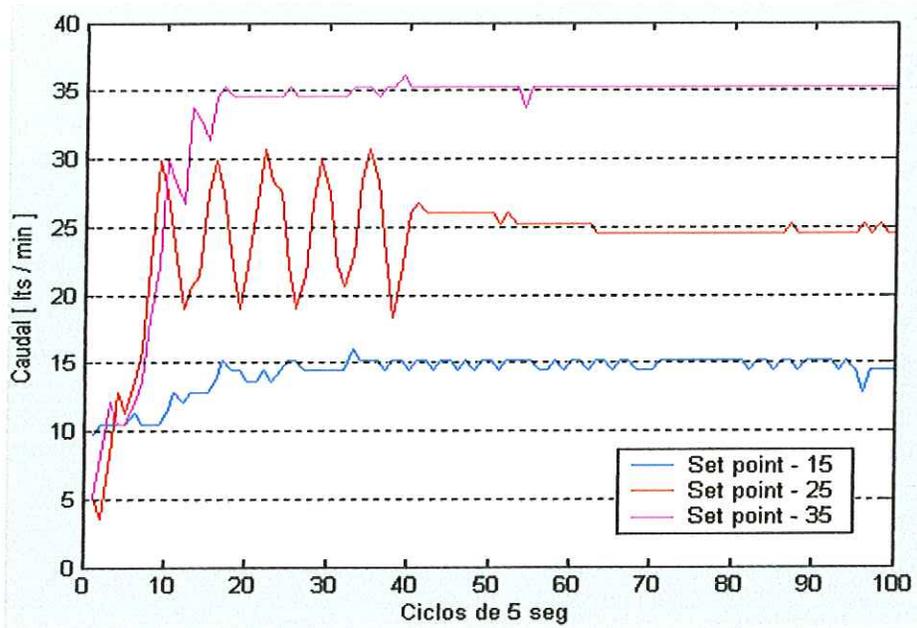
Cambio del error en el tiempo



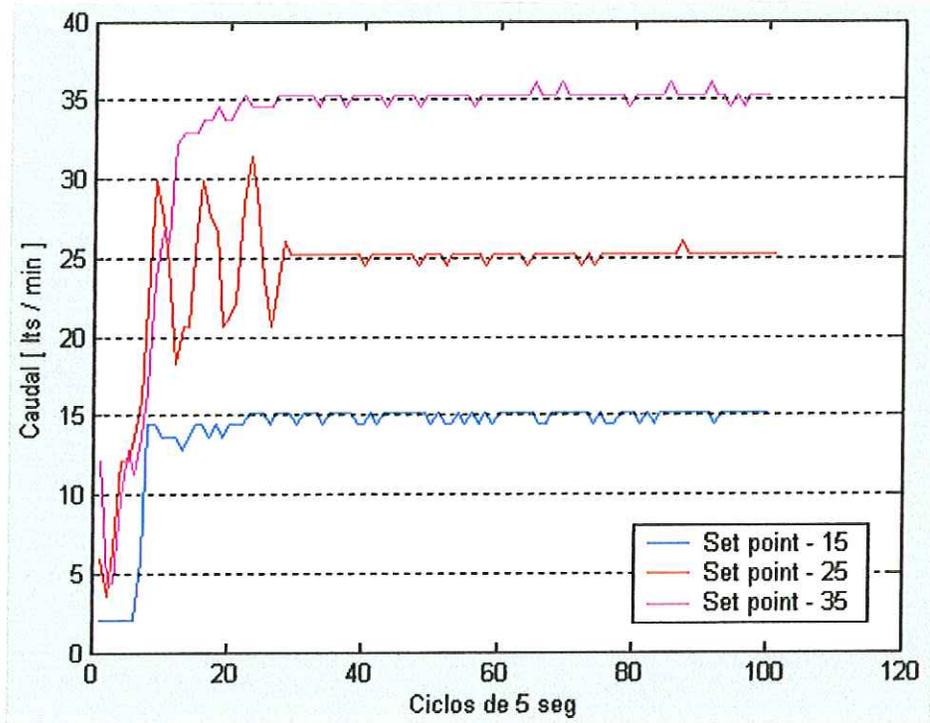
ANEXO 3. TERCEROS CONJUNTOS BORROSOS ESCOGIDOS PARA LA EXPLICACION DE LA SINTONIZACION DEL CONTROL DIFUSO DE CAUDAL



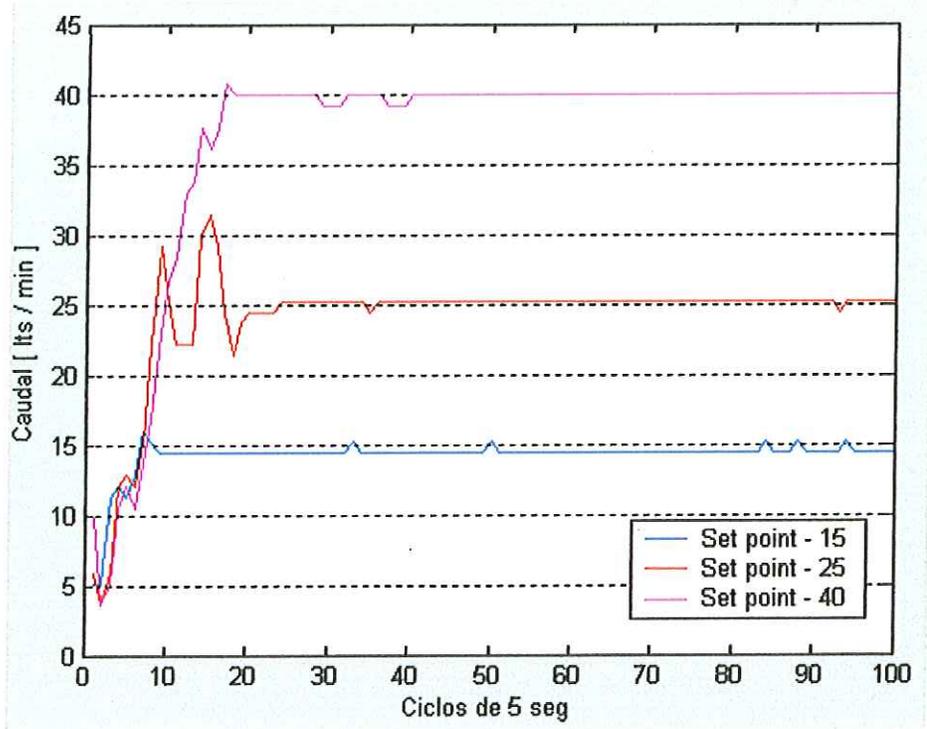
ANEXO 4. RESPUESTAS DEL CONTROL DIFUSO



Respuesta del control difuso de caudal con los primeros conjuntos borrosos escogidos

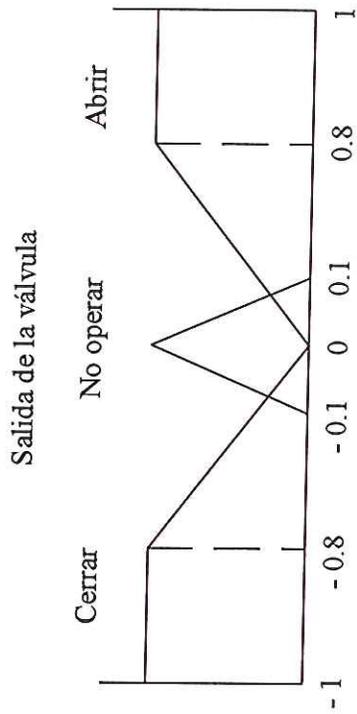
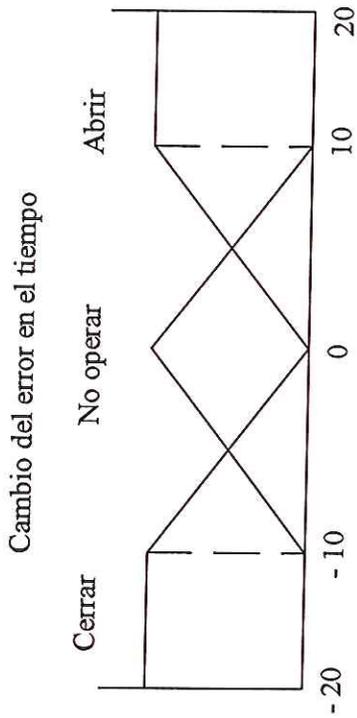
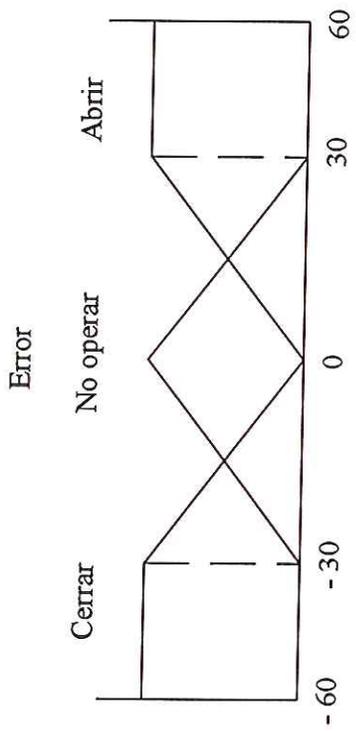


Respuesta del control difuso de caudal con los segundos conjuntos borrosos escogidos

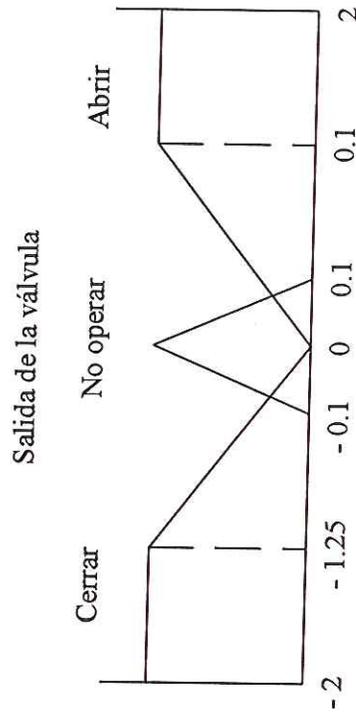
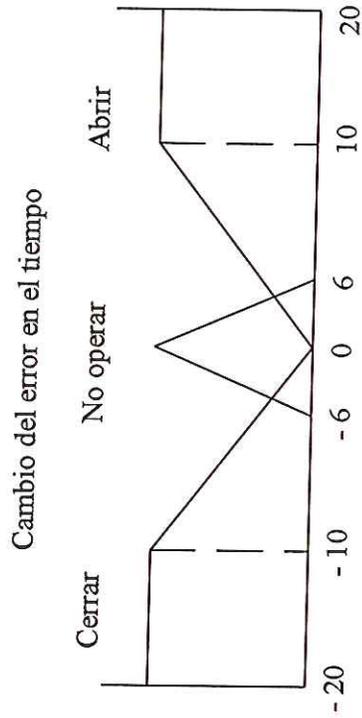
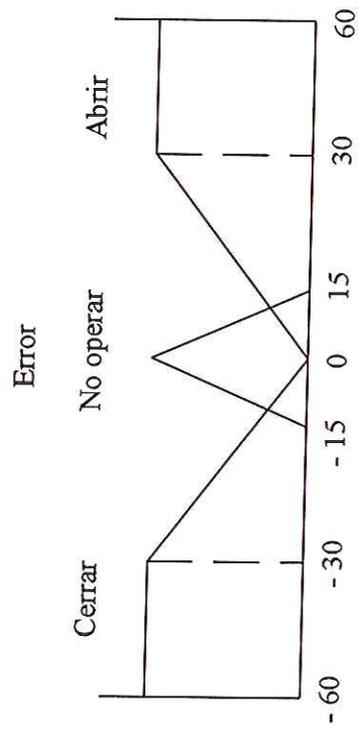


Respuesta del control difuso de caudal con los terceros conjuntos borrosos escogidos

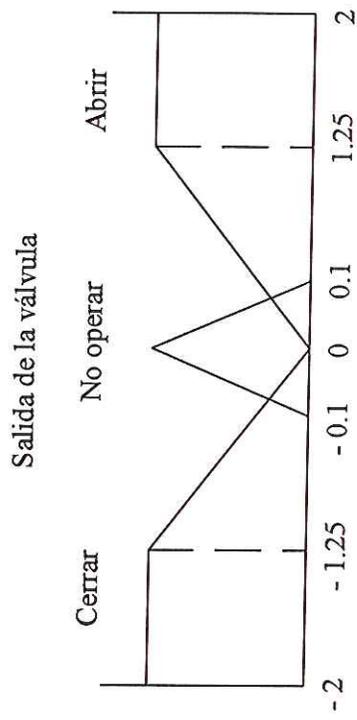
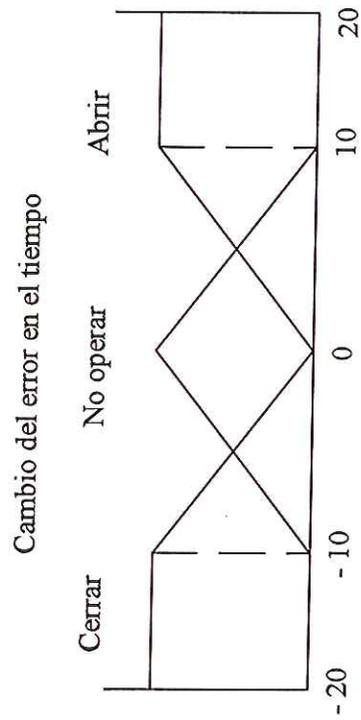
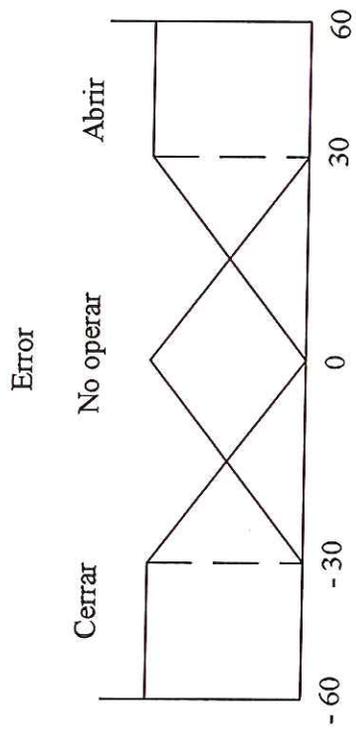
ANEXO 5. PRIMEROS CONJUNTOS BORROSOS ESCOGIDOS PARA LA EXPLICACION DE LA SINTONIZACION DEL CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA



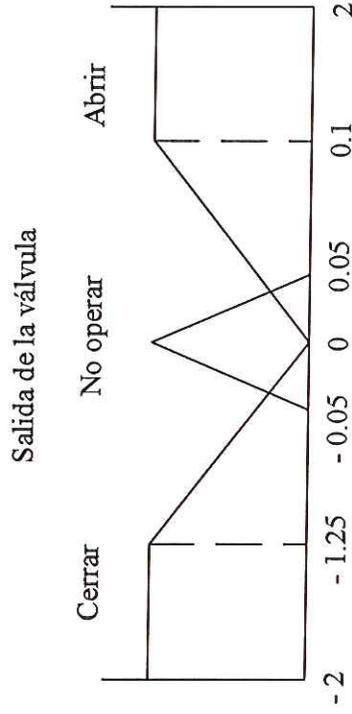
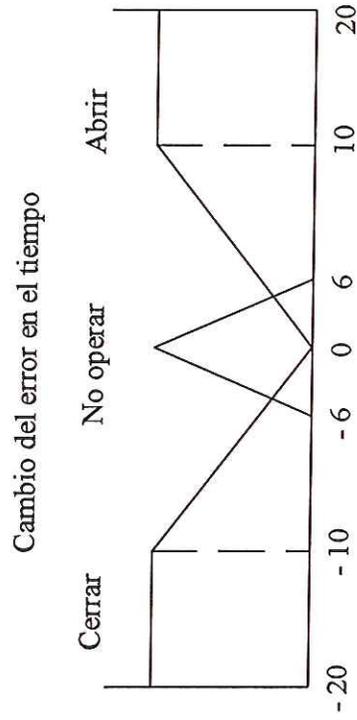
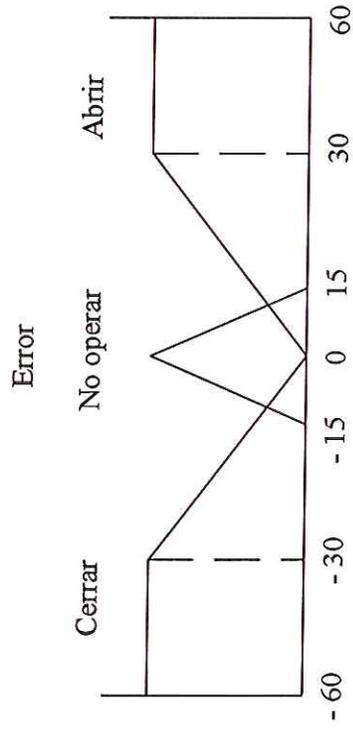
ANEXO 6. SEGUNDOS CONJUNTOS BORROSOS ESCOGIDOS PARA LA EXPLICACION DE LA SINTONIZACION DEL CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA



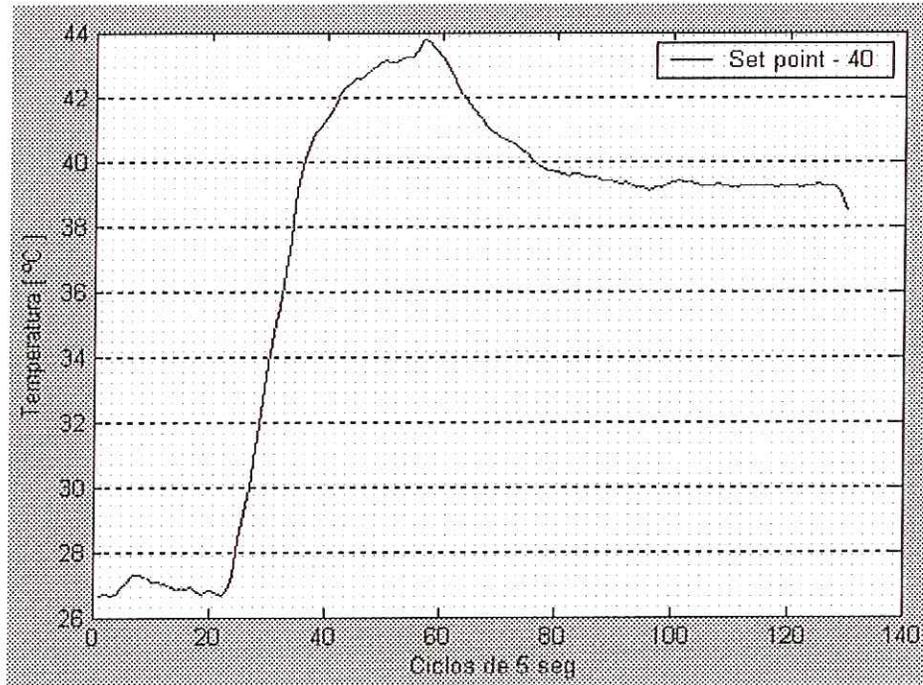
ANEXO 7. TERCEROS CONJUNTOS BORROSOS ESCOGIDOS PARA LA EXPLICACION DE LA SINTONIZACION DEL CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA



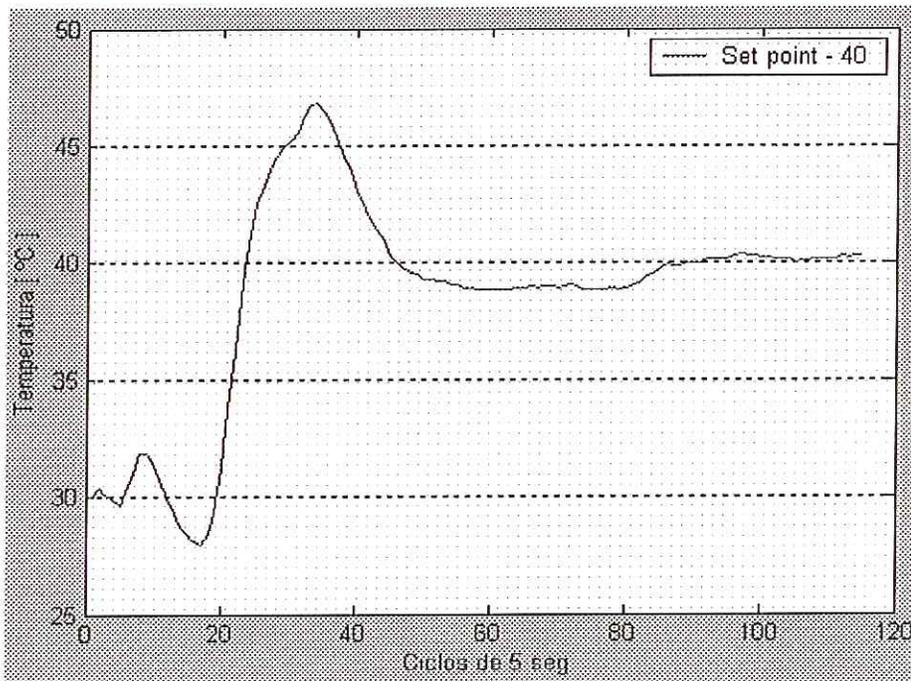
ANEXO 8. CUARTOS CONJUNTOS BORROSOS ESCOGIDOS PARA LA EXPLICACION DE LA SINTONIZACION DEL CONTROL DIFUSO DE TEMPERATURA



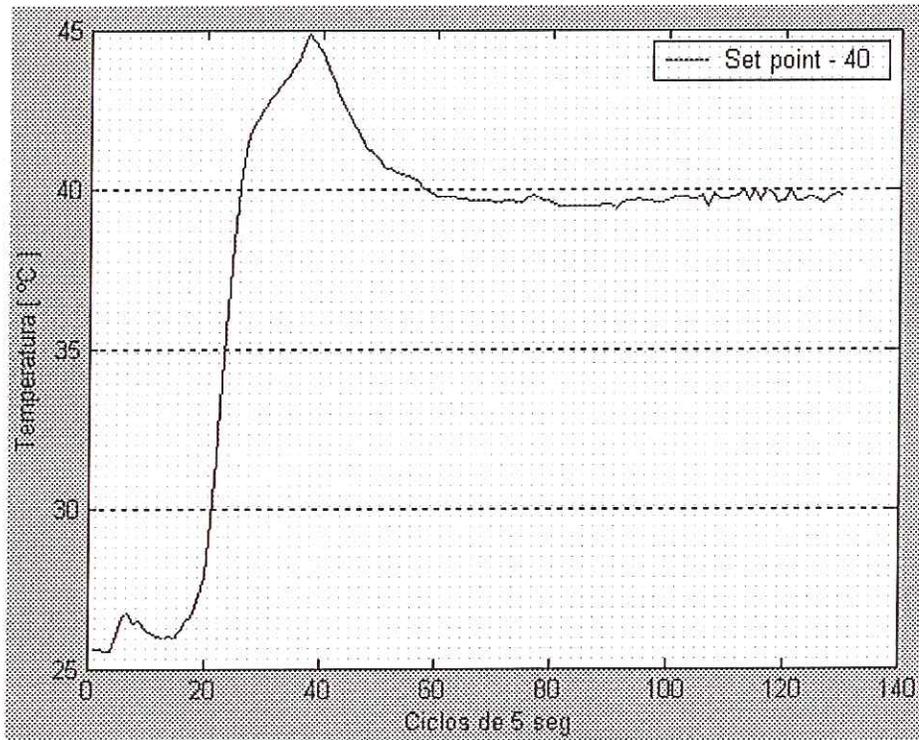
ANEXO 9. RESPUESTAS DEL CONTROL



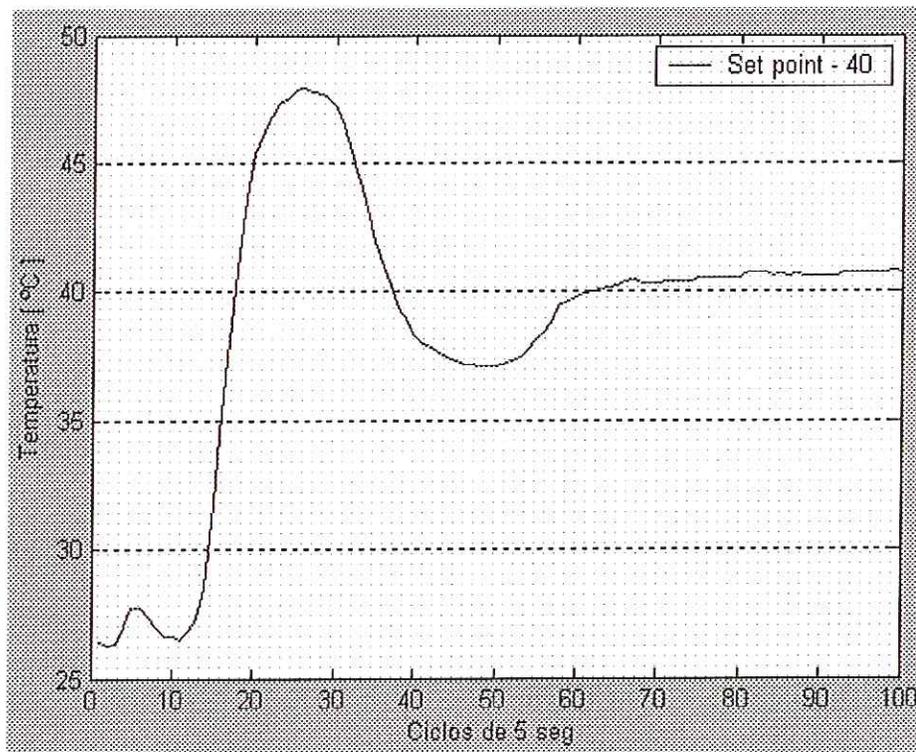
Respuesta del control difuso de temperatura con los primeros conjuntos borrosos escogidos



Respuesta del control difuso de temperatura con los segundos conjuntos borrosos escogidos



Respuesta del control difuso de temperatura con los terceros conjuntos borrosos escogidos



Respuesta del control difuso de temperatura con los cuartos conjuntos borrosos escogidos

SOFTWARE DE CONTROL DIFUZZO

```
// SE INCLUYEN LAS LIBRERIAS NECESARIAS PARA EL PROGRAMA

#include "FieldPoint.h"
#include <formatio.h>
#include <ansi_c.h>
#include <cvirte.h>
#include <userint.h>
#include "ULTIMO PROGRAMA FUZZY.h"

// SE DEFINE EL TAMAÑO DEL BUFFER

#define BUFFER_SIZE 256

// SE DEFINEN LAS VARIABLES DE CADA UNO DE LOS PANELES

static int panelUno,panelSal,panelGraf;

// SE DEFINEN LAS VARIABLES DEL PROGRAMA

float  errorneg1,errorneg2,errorneg3,errorzero1,errorzero2,errorzero3, errorpost1,errorpost2,errorpost3;
float  errorneg1temp,errorneg2temp,errorneg3temp,errorzero1temp,
      errorzero2temp,errorzero3temp,errorpost1temp,errorpost2temp,errorpost3temp;
float  changerrorneg1,changerrorneg2,changerrorneg3,changerrorzero1,changerrorzero2,
      changerrorzero3,changerrorpost1,changerrorpost2,changerrorpost3;
float  changerrorneg1temp,changerrorneg2temp,changerrorneg3temp,changerrorzero1temp,
      changerrorzero2temp,changerrorzero3temp,changerrorpost1temp,changerrorpost2temp,
      changerrorpost3temp;
float  corrcerrar1,corrcerrar2,corrcerrar3,cormnooperar1,cormnooperar2,cormnooperar3,
      corrabrir1,corrabrir2,corrabrir3;
float  corrcerrar1temp,corrcerrar2temp,corrcerrar3temp,cormnooperar1temp,
      cormnooperar2temp,cormnooperar3temp,corrabrir1temp,corrabrir2temp,corrabrir3temp;
float  setpoint,caudal,error,cambiodelerror,errorcero=0,corri;
float  setpointtemp,caudaltemp,errortemp,cambiodelerrortemp,errorcerotemp=0;
float  m1er,m2er,m3er,m4er,m5er,m6er,m1cher,m2cher,m3cher,m4cher,m5cher,m6cher,
      m1corr,m2corr,m3corr,m4corr,m5corr,m6corr,pertenencianeg,
      pertenencianeg2,pertenenciazero,pertenenciazero2,pertenenciapost,pertenenciapost2;
float  m1ertemp,m2ertemp,m3ertemp,m4ertemp,m5ertemp,m6ertemp,m1chertemp,
      m2chertemp,m3chertemp,m4chertemp,m5chertemp,m6chertemp,m1corrtemp,m2corrtemp,
      m3corrtemp,m4corrtemp,m5corrtemp,m6corrtemp,pertenencianegtemp,pertenencianeg2temp,
      pertenenciazerotemp,pertenenciazero2temp,pertenenciaposttemp,pertenenciapost2temp;
float  pertenenciadelcambioneg,pertenenciadelcambiozero,pertenenciadelcambiopost,
      y1,y2,y3,y4,a,b,c,d,e,f;
float  pertenenciadelcambionegtemp,pertenenciadelcambiozerotemp,pertenenciadelcambioposttemp;
float  pendientepost,pendienteneg,pertenencia,case2cerr,case1nop,case2nop,case1abr;
float  pendienteposttemp,pendientenegtemp,pertenenciatemp,case2tempcerr,
      case1tempnop,case2tempnop,case1tempabr;
float  CGCC,CGCCTEM,DVCGCC,DVCGCCTEM,CGCNOP,CGCNOPTM,CGCAB,CGCABTEM,
      DVCGCAB,DVCGCABTEM,ACC,ACCTEM;
float  ACNOP,ACNOPTM,ACAB,ACABTEM,PMCCERR,PMCCERRTEM,PMCABIR,
      PMCABIRTEM;
int    valorerror,valorchangerror,valorvalvula,i,regla=0,variable=0,control,
      case3=0,contplot=6,contplot2=6,k;
int    valorerrortemp,valorchangerrortemp,valorvalvulatemp,ityp,reglatemp=0,
      variabletemp=0,controltemp,case3temp=0,contplottemp=6,contplot2temp=6,ktemp;
int    Ruleand[20][3];
```

```

int metodo;
float vecperchangerror[10],vecperterror[10],newvectorper[10],inferenciacerrar,
    inferencianooperar,inferenciaabrir,defuzificado,defuz,defuzificadocero=0,corriente;
float vecperchangerrortemp[10],vecpererrortemp[10],newvectorpertemp[10],
    inferenciacerrartemp,inferencianooperartemp,inferenciaabrirtemp,
    defuzificadotemp,defuztemp,defuzificadocerotemp=0,corrientetemp;
int  errorneg,errorzero,errorpost,cont=1,rta,conjuntos,conjuntos2,band1,
    band2,band3,band4,band5,band6,z=1,i,j;
int  errornegttemp,errorzerotemp,errorposttemp,conttemp=1,rtatemp,conjuntostemp,
    conjuntos2temp,band1temp,band2temp,band3temp,band4temp,band5temp,
    band6temp,ztemp=1,itemp,jtemp;

static float value,errortemper,temporal,bandera,temp, banderatwo;
static char  message[256];
static int  ms,ms1,ms0=0,ciclo=0,n=0,nn=0,ntemp;
static float ls;

// SE DEFINEN LAS VARIABLES DE LOS NOMBRES DE LOS DISPOSITIVOS DEL FIELD
POINT

static char  itemName[100],itemName2[100],itemName3[100], deviceName[100],
    deviceName2[100],deviceName3[100], resource[100], path[100], pathcmp[100];

// SE DEFINEN LAS VARIABLES NECESARIAS PARA EL MANEJO DE LOS FIELD POINT

static int nullval;
static IAStatus status;
static IAHandle IAKhandle, handle;
static IAHandle IOhandle[4];
static IAHandle timerCntHandle;
static IAHandle IOPointHandle;
static IAByte readBuffer[100],currentTemp[100];
static double controlRate,controlRatetemp;
static SYSTEMTIME sysTime,timestamp;
static float vectorcaudal[100];
static IAByte valu[BUFFER_SIZE];

// SE DEFINEN LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS DONDE SE GUARDAN LOS DATOS

FILE *datos;
FILE *datosdos;
FILE *datostres;
FILE *datoscuatro;

//SE DECLARAN DE LAS FUNCIONES

void Error(IAStatus);
float Leercaudal(float);
void Escribircorriente (float);
void Escribircorrienteval2 (float);
float LeerTemper (float);

// FUNCION PRINCIPAL

int main (int argc, char *argv[])
{
// SE DEFINE LOS NOMBRES DE LOS ARCHIVOS QUE SE CREAN

datos=fopen("caudal.txt","w");
datosdos=fopen("corriente.txt","w");

```

```

datostres=fopen("temperatura.txt","w");
datoscuatro=fopen("corrienteval2.txt","w");

```

// SE CARGA EL PANEL PRINCIPAL DEL PROGRAMA

```

if (InitCVIRTE (0, argv, 0) == 0)
return -1;
if ((panelUno = LoadPanel (0, "ULTIMO PROGRAMA FUZZY.uir", PANEL_UNO)) < 0)
return -1;

```

**// SE INICIALIZAN LAS VARIABLES DE LOS DISPOSITIVOS DE FIELD POINT
(DEVICENAME) SE INICIALIZAN LAS VARIABLES DE LOS CANALES A UTILIZAR
(ITEMNAME) SE INICIALIZA LAS VARIABLES NECESARIAS PARA EL MANEJO DE LOS
FIELD POINT**

```

for (i=0; i<100; i++)
{
itemName[i] = 0x00;
itemName2[i] = 0x00;
itemName3[i] = 0x00;
deviceName[i] = 0x00;
deviceName2[i] = 0x00;
deviceName3[i] = 0x00;
resource[i] = 0x00;
path[i] = 0x00;
pathcmp[i] = 0x00;
currentTemp[i] = 0x00;
readBuffer[i] = 0x00;
}

```

```

for (i=0; i<256; i++) {
message[i] = 0x00;
}

```

```

for (i=0; i<4; i++) {
IOhandle[i] = 0x00;
}

```

```

DisplayPanel (panelUno);
RunUserInterface ();
DiscardPanel (panelUno);
return 0;
}

```

// FUNCION QUE CARGA EL PANEL DE LOS CONJUNTOS DE ENTRADA

```

int CVICALLBACK PANEL_CONJ_ENTRADA (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_COMMIT:
if ((panelGraf = LoadPanel (0, "ULTIMO PROGRAMA FUZZY.uir", PANEL_GRAF)) < 0)
return -1;
DisplayPanel (panelGraf);
RunUserInterface ();
DiscardPanel (panelGraf);
break;
}
}

```

```

}
return 0;
}

```

// FUNCION QUE CARGA EL PANEL DE SALIDA

```

int CVICALLBACK PANEL_SALIDA (int panel, int control, int event,
                             void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_COMMIT:
if ((panelSal = LoadPanel (0, "ULTIMO PROGRAMA FUZZY.uir", PANEL_SAL)) < 0)
return -1;
DisplayPanel (panelSal);
RunUserInterface ();
DiscardPanel (panelSal);
break;
}
return 0;
}

```

// FUNCION QUE SE ACTIVA AL SER OPRIMIDO EL BOTON START, Y SE ENCARGA DE CONFIGURAR LOS FIELD POINT PARA PODER TRABAJAR

```

int CVICALLBACK STAR (int panel, int control, int event,
                     void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_COMMIT:

```

// SE TOMA DEL PANEL PRINCIPAL, EL NOMBRE DE LOS DISPOSITIVO A UTILIZAR, EL NOMBRE DEL ARCHIVO.IAK DEL MEASUREMENT AND AUTOMATION Y EL NOMBRE DE LA FUENTE DEL MISMO ARCHIVO

```

GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_IAK_Path, path);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_RESOURCE_NAME, resource);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_device_name, deviceName);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_DECIVE_NAME_2, deviceName2);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_device_name_3, deviceName3);

```

// REvisa EL PATH, QUE ES EL ARCHIVO.IAK VERIFICA SI EL USUARIO INGRESO EL NOMBRE, O TOMA EL ASIGNADO POR DEFECTO (c:/danielrangel.iak)

```

nullval = strcmp (path, pathcmp);
if (!nullval)
{
status = FP_Open ("c:/danielrangel.iak", &IAKhandle);
}
else
{
status = FP_Open (path, &IAKhandle);
}

```

// SE TOMA EL NOMBRE DEL CANAL QUE VA A UTILIZAR EL DISPOSITIVO

```

GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_ITEM_NAME_CORR, itemName2);

```

```

// CREA EL TAG PARA LA SALIDA DE CORRIENTE, LLAMANDO LA FUNCION DE
ERROR

if (status = FP_CreateTagIOPoint (IAKhandle, resource, deviceName2, itemName2,&IOPointHandle))
{
Error(status);
QuitUserInterface (0);
return(0);
}

// SE INTRODUCE EL CANAL A UTILIZAR EN EL FIELD POINT DEL CAUDALIMETRO
(COUNT INPUNT 0) EN LA VARIABLE ITEMNAME3,

k=0;
Fmt (itemName3, "Count Input %i", k);

// CREA EL TAG PARA EL CAUDALIMETRO

status = FP_CreateTagIOPoint (IAKhandle, resource, deviceName3, itemName3,&timerCntHandle);

// CREA EL TAG PARA LAS TERMOCUPLAS

for (i=0; i<2; i++)
{

// INTRODUCE EL CANAL A UTILIZAR DEL DISPOSITIVO DE TERMOCUPLAS, EN LA
VARIABLE ITEMNAME

Fmt (itemName, "Channel %i", i);

// CREA UN TAG PARA CADA UNO DE LOS CANALES DE TEMPERATURA
SELECCIONADOS

status = FP_CreateTagIOPoint (IAKhandle, resource, deviceName, itemName,&IOhandle[i]);
    handle = IOhandle[i];
}

// SE VERIFICA SI SE PRODUJO ALGUN ERROR EN LA CREACION DEL TAG

if (status)
{
Error(status);
QuitUserInterface (0);
return(0);
break;
}
return 0;
}

//FUNCION QUE CALCULA LA PENDIENTE POSITIVA DE LOS CONJUNTOS

float calcularpendientepost(float y2 ,float y1)
{
cont=cont+1;
pendientepost=1/(y2-y1);
return (pendientepost);
}

//FUNCION QUE CALCULA LA PENDIENTE NEGATIVA DE LOS CONJUNTOS

```

```

float calcularpendienteneg(float y3, float y2)
{
cont=cont+1;
pendienteneg=-1/(y3-y2);
return (pendienteneg);
}

```

// FUNCION QUE SE ACTIVA AL SER OPRIMIDO EL BOTON GRAFICAR, Y SE ENCARGA DE DIBUJAR LOS CONJUNTOS DIFUSOS, Y DE CALCULAR SUS PENDIENTES, PARA PODER CALCULAR EL GRADO DE PERTENENCIA DE CADA UNO DE LAS VARIABLES DE ENTRADA AL CONTROLADOR

```

int CVICALLBACK GRAFICAR (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)

```

```

{
switch (event)
{
case EVENT_COMMIT:

```

// BORRA LAS LINEAS INDESEADAS EN LAS GRAFICAS DE LOS CONJUNTOS DEL ERROR, DEL CAMBIO DEL ERROR Y DE LA SALIDA DE CORRIENTE

```

DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, -1,VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, -1,VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, -
1,VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, -
1,VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, -
1,VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, -
1,VAL_IMMEDIATE_DRAW);

```

//TOMA EL VALOR DE CADA PUNTO DE LOS CONJUNTO Y CALCULA LA PENDIENTE PENDIENTES DE LOS CONJUNTOS DEL ERROR

```

GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_O1, &erroneg1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_O2, &erroneg2);
m1er=0;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_O1_TEMP, &erroneg1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_O2_TEMP, &erroneg2temp);
m1ertemp=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_O3, &erroneg3);
m2er=calcularpendienteneg(erroneg3,erroneg2);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_O3_TEMP, &erroneg3temp);
m2ertemp=calcularpendienteneg(erroneg3temp,erroneg2temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_11, &errorzero1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_12, &errorzero2);
m3er=calcularpendientepost(errorzero2,errorzero1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_11_TEMP, &errorzero1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_12_TEMP, &errorzero2temp);
m3ertemp=calcularpendientepost(errorzero2temp,errorzero1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_13, &errorzero3);
m4er=calcularpendienteneg(errorzero3,errorzero2);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_13_TEMP, &errorzero3temp);
m4ertemp=calcularpendienteneg(errorzero3temp,errorzero2temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_21, &errorpost1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_22, &errorpost2);

```

```

m5er=calcularpendientepost(errorpost2,errorpost1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_21_TEMP, &errorpost1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_22_TEMP, &errorpost2temp);
m5ertemp=calcularpendientepost(errorpost2temp,errorpost1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_23, &errorpost3);
m6er=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_TRIANGULO_23_TEMP, &errorpost3temp);
m6ertemp=0;
cont=cont+1;

```

//PENDIENTES DE LOS CONJUNTOS DEL CAMBIO DEL ERROR

```

GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_01, &changerroneg1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_02, &changerroneg2);
m1cher=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_01_TEMP, &changerroneg1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_02_TEMP, &changerroneg2temp);
m1chertemp=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_03, &changerroneg3);
m2cher=calcularpendienteneg(changerroneg3,changerroneg2);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_03_TEMP, &changerroneg3temp);
m2chertemp=calcularpendienteneg(changerroneg3temp,changerroneg2temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_11, &changerrorzero1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_12, &changerrorzero2);
m3cher=calcularpendientepost(changerrorzero2,changerrorzero1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_11_TEMP, &changerrorzero1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_12_TEMP, &changerrorzero2temp);
m3chertemp=calcularpendientepost(changerrorzero2temp,changerrorzero1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_13, &changerrorzero3);
m4cher=calcularpendienteneg(changerrorzero3,changerrorzero2);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_13_TEMP, &changerrorzero3temp);
m4chertemp=calcularpendienteneg(changerrorzero3temp,changerrorzero2temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_21, &changerrorpost1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_22, &changerrorpost2);
m5cher=calcularpendientepost(changerrorpost2,changerrorpost1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_21_TEMP, &changerrorpost1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_22_TEMP, &changerrorpost2temp);
m5chertemp=calcularpendientepost(changerrorpost2temp,changerrorpost1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_23, &changerrorpost3);
m6cher=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CAMBIOERROR_23_TEMP, &changerrorpost3temp);
m6chertemp=0;
cont=cont+1;

```

// PENDIENTES DE LOS CONJUNTOS DE CORRIENTE DE SALIDA

```

GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_CERR1, &corrccerrar1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_CERR2, &corrccerrar2);
m1corr=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_CERR1_TEMP, &corrccerrar1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_CERR2_TEMP, &corrccerrar2temp);
m1corrtemp=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_CERR3, &corrccerrar3);
m2corr=calcularpendienteneg(corrccerrar3,corrccerrar2);

```

```

GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_CERR3_TEMP, &correrrar3temp);
m2corrtemp=calcularpendienteneg(correrrar3temp,correrrar2temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_NOOPER1, &cornnooperar1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_NOOPER2, &cornnooperar2);
m3corr=calcularpendientepost(cornnooperar2,cornnooperar1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_NOOPER1_TEMP, &cornnooperar1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_NOOPER2_TEMP, &cornnooperar2temp);
m3corrtemp=calcularpendientepost(cornnooperar2temp,cornnooperar1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_NOOPER3, &cornnooperar3);
m4corr=calcularpendienteneg(cornnooperar3,cornnooperar2);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_NOOPER3_TEMP, &cornnooperar3temp);
m4corrtemp=calcularpendienteneg(cornnooperar3temp,cornnooperar2temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_ABRIR1, &corrabrir1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_ABRIR2, &corrabrir2);
m5corr=calcularpendientepost(corrabrir2,corrabrir1);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_ABRIR1_TEMP, &corrabrir1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_ABRIR2_TEMP, &corrabrir2temp);
m5corrtemp=calcularpendientepost(corrabrir2temp,corrabrir1temp);
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_ABRIR3, &corrabrir3);
m6corr=0;
cont=cont+1;
GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_CORRI_ABRIR3_TEMP, &corrabrir3temp);
m6corrtemp=0;
cont=cont+1;

```

// TOMA EL METODO DE DEFUZIFICACION QUE SE VA A UTILIZAR Y ASIGNA UN NUMERO A LA VARIABLE METODO

```
GetCtrlVal (panelGraf, PANEL_GRAF_RINGSLIDE, &metodo);
```

// DIBUJA LOS CONJUNTOS DEL ERROR CAUDAL

```

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, errorneg1, 1, errorneg2, 1, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, errorneg2, 1, errorneg3, 0,VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, errorzero1, 0, errorzero2, 1,
VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, errorzero2, 1, errorzero3,
0,VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, errorpost1, 0, errorpost2, 1,
VAL_BLUE);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, errorpost2, 1, errorpost3, 1,
VAL_BLUE);

```

// DIBUJA LOS CONJUNTOS DEL ERROR DE LA TEMPERATURA

```

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, errorneg1temp,1, errorneg2temp,
1, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, errorneg2temp, 1, errorneg3temp,
0,VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, errorzero1temp, 0,
errorzero2temp, 1, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, errorzero2temp, 1,
errorzero3temp, 0,VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, errorpost1temp, 0,
errorpost2temp, 1, VAL_BLUE);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, errorpost2temp, 1,
errorpost3temp, 1, VAL_BLUE);

```

// DIBUJA LOS CONJUNTOS DEL CAMBIO DEL ERROR CAUDAL

```

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, changerrorneg1, 1,
          changerrorneg2, 1, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, changerrorneg2, 1,
          changerrorneg3, 0, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, changerrorzero1, 0,
          changerrorzero2, 1, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, changerrorzero2, 1,
          changerrorzero3, 0, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, changerrorpost1, 0,
          changerrorpost2, 1, VAL_BLUE);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, changerrorpost2, 1,
          changerrorpost3, 1, VAL_BLUE);

// DIBUJA LOS CONJUNTOS DEL CAMBIO DEL ERROR TEMPERATURA

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, changerrorneg1temp, 1,
          changerrorneg2temp, 1, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, changerrorneg2temp, 1,
          changerrorneg3temp, 0, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, changerrorzero1temp, 0,
          changerrorzero2temp, 1, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, changerrorzero2temp, 1,
          changerrorzero3temp, 0, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, changerrorpost1temp, 0,
          changerrorpost2temp, 1, VAL_BLUE);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, changerrorpost2temp, 1,
          changerrorpost3temp, 1, VAL_BLUE);

// DIBUJA LOS CONJUNTOS DE LA CORRIENTE DE CAUDAL

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, corrcerrar1, 1, corrcerrar2,
          1, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, corrcerrar2, 1, corrcerrar3,
          0, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, cormnooperar1, 0, cormnooperar2,
          1, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, cormnooperar2, 1, cormnooperar3,
          0, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, corrabrir1, 0, corrabrir2,
          1, VAL_BLUE);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, corrabrir2, 1, corrabrir3,
          1, VAL_BLUE);

// DIBUJA LOS CONJUNTOS CORRIENTE DE TEMPERATURA

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, corrcerrar1temp, 1,
          corrcerrar2temp, 1, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, corrcerrar2temp, 1,
          corrcerrar3temp, 0, VAL_RED);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, cormnooperar1temp, 0,
          cormnooperar2temp, 1, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, cormnooperar2temp, 1,
          cormnooperar3temp, 0, VAL_GREEN);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, corrabrir1temp, 0,
          corrabrir2temp, 1, VAL_BLUE);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, corrabrir2temp, 1,
          corrabrir3temp, 1, VAL_BLUE);
break;
}
return 0;

```

```
}
```

//FUNCION DE ERROR

```
void Error (IAStatus status)
{
if (status !=0) {
FP_ErrorMsg (IAKhandle, status, message);
MessagePopup ("Error", message);
}
}
```

// FUNCION QUE LEE EL CAUDAL DE TRABAJO

```
float Leercaudal (float setpoint)
{
```

// ISNTRUCCION QUE LEE EL BUFER Y LO GUARDA EN UNA VARIABLE

```
status = FP_Read (IAKhandle, timerCntHandle, readBuffer, 100, &timestamp);
ms = *((int*)(readBuffer));
ms1 = ms;
ms = ms1-ms0;
if (ms<0)
{
ms=(ms1+65535)-ms0;
}
ms = ms/controlRate;
ms0= ms1;
fprintf(datos," CAUDAL = %.1f \n ",ls);
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CAUDAL_DE_TRABAJO_2, ls);
if (n>2)
{
PlotStripChartPoint (panelSal, PANEL_SAL_GRAF_CAUDAL, ls);
}
error = ls - setpoint;
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_ERROR_CAUDAL, error);
return (error);
}
```

// FUNCION QUE LEE LA TEMPERATURA DE TRABAJO

```
float LeerTemper (float setpointemper)
{
for (i=0; i<2; i++)
{
```

//LEE CADA CANAL DE LAS TERMOCUPLAS Y GUARDA SU VALOR EN UNA VARIABLE

```
status = FP_Read (IAKhandle, IOhandle[i], currentTemp, 100, &sysTime);
value = *((float*)(currentTemp));
if (i==0)
{
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_TEMP_DE_SALIDA, value);
PlotStripChartPoint (panelSal, PANEL_SAL_GRAF_TEMP, value);
fprintf(datostres," temperatura = %f \n ",value);
errortemper = value - setpointemper;
```

```

SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_ERROR_TEMP, errortemper);
}
else
{
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_TEMP_DE_ENTRADA, value);
}
}
return (errortemper);
}

```

// FUNCION QUE ENVIA LA CORRIENTE A LA VALVULA DEL AGUA

```

void Escribircorriente (float temp)
{
defuzificadocero=temp;
temp=temp*pow(10,-3);
memcpy (valu, &temp, 4);
}

```

// ESCRIBE Y ENVIA EL VALOR QUE EL CONTROLADOR SACA HACIA LA VALVULA

```

FP_Write (IAKhandle, IOPointHandle, valu, BUFFER_SIZE);
temp=temp/pow(10,-3);
fprintf(datosdos," corriente = %f\n ",temp);
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CORRIENTE, temp);
}

```

// FUNCION QUE ENVIA LA CORRIENTE A LA VALVULA DEL VAPOR

```

void Escribircorrienteval2 (float temporal)
{
defuzificadocerotemp=temporal;
temporal=temporal*pow(10,-3);
memcpy (valu + (4), &temporal, 4);
}

```

//Escribe el valor en el modulo

```

FP_Write (IAKhandle, IOPointHandle, valu, BUFFER_SIZE);
temporal=temporal/pow(10,-3);
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CORRIENTE_TEMP, temporal);
fprintf(datoscuatro," corriente val2 = %f\n ",temporal);
}

```

//FUNCION QUE IDENTIFICA LOS CONJUNTOS QUE INTERACTUAN EN UNA VARIABLE

```

void determinarconjunto (float set,float a,float b,float c,float d,float e,float f)
{
if ((set > a) && (set < b))
{
errorneg = 1;
if (set > c)
{
errorzero = 1;
if (set > e)
{
errorpost =1;
}
}
else
{
errorpost = 0;
}
}
}

```

```

    }
else
{
    errorzero = 0;
}
}
else
{
    errorneg=0;
}
if ((set > c) && (set < d))
{
    errorzero = 1;
    if (set > e)
    {
        errorpost = 1;
    }
else
{
    errorpost = 0;
}
}
else
{
    errorzero = 0;
}
if ((set > e) && (set < f))
{
    errorpost = 1;
}
else
{
    errorpost = 0;
}
if (controltemp)
{
    errornegtemp=errorneg;
    errorzerotemp=errorzero;
    errorposttemp=errorpost;
}
}

```

// FUNCION QUE CALCULA LA PERTENENCIA DE LOS CONJUTO, PARA CADA UNA DE LAS VARIABLES

```

float calpertenencia (int bandera,float set,float a,float b,float c,float d,float e)
{
if (bandera)
{
    if (set < b)
    {
        pertenencia= d*(set-b)+1;
    }
else
{
    if (set == b)
    {
        pertenencia=1;
    }
else

```

```

    {
        pertenencia= e*(set-b)+1;
    }
}
return (pertenencia);
}
else
{
return (0);
}
}

```

// FUNCION QUE ES LLAMADA POR EL TIMER DE CAUDAL Y REALIZA EL CONTROL DEL CAUDAL

```

int CVICALLBACK TIMER_CAUDAL (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)

```

```

{
switch (event)
{

```

```

case EVENT_TIMER_TICK:

```

// TOMA EL VALOR DEL CONTROL RATE, Y LO SETEA EN EL TIMER DE CAUDAL

```

GetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CONTROL_RATE, &controlRate);
SetCtrlAttribute (panelSal, PANEL_SAL_TIMER_CAUDAL, ATTR_INTERVAL,controlRate);

```

// PREGUNTA SI SE REALIZA EL CONTROL DE CAUDAL

```

GetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CONTROL, &control);
if (control)
{
n=n+1;

```

// TOMA EL VALOR DE CONSIGNA DEL CAUDAL

```

GetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_SET_POINT, &setpoint);

```

// LLAMA LA FUNCION LEERCAUDAL LA CUAL DEVUELVE EL ERROR

```

error=Leercaudal(setpoint);
if (n > 2)
{

```

// CALCULA EL CAMBIO DEL ERROR EN EL TIEMPO

```

cambiodeerror= (error-errorcero)/controlRate;
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CAMBIO_DEL_ERROR, cambiodeerror);

```

// DIBUJA LAS ENTRADAS DEL CONTROLADOR

```

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, cambiodeerror, 1,
cambiodeerror, 0, VAL_DK_MAGENTA);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, error, 1,error, 0,
VAL_DK_MAGENTA);
contplot2=contplot2+1;
errorcero=error;

```

// BORRA LAS ULTIMAS ENTRDAS DEL CONTROLADOR Y LA ULTIMA RESPUESTA

```

if (case3)
{
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, contplot-3,
VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, contplot-2,
VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, contplot-1,
VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, contplot,
VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, contplot2-1,
VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR, contplot2-1,
VAL_IMMEDIATE_DRAW);
}

//IDENTIFICA LOS CONJUNTOS EN LOS QUE SE ENCUENTRA EL ERROR

determinarconjunto (error,errorneg1,errorneg3,errorzero1,errorzero3, errorpost1,errorpost3);
band1=errorneg; band2=errorzero;band3=errorpost;

//DATERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL ERROR SI ESTA DENTRO DEL
CONJUNTO NEGATIVO

pertenencianeg= calpertenencia(band1,error,errorneg1,errorneg2,errorneg3, m1er,m2er);
vecperterror[1]=pertenencianeg;

//DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL ERROR SI ESTA DENTRO DEL
CONJUNTO CERO

pertenenciazero= calpertenencia (band2,error,errorzero1,errorzero2, errorzero3,m3er,m4er);
vecperterror[2]=pertenenciazero;

//DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL ERROR SI ESTA DENTRO DEL
CONJUNTO POSITIVO

pertenenciapost= calpertenencia(band3,error,errorpost1,errorpost2, errorpost3,m5er,m6er);
vecperterror[3]=pertenenciapost;

//IDENTIFICA LOS CONJUNTOS EN LOS QUE ESTA EL CAMBIO DEL ERROR

determinarconjunto (cambiodelerror,changerrorneg1,changerrorneg3, changerrorzero1,
changerrorzero3,changerrorpost1,changerrorpost3);
band4=errorneg;band5=errorzero;band6=errorpost;

// DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL CAMBIO DEL ERROR SI ESTA
DENTRO DEL CONJUNTO NEGATIVO

pertenenciadelcambioneg=calpertenencia(band4,cambiodelerror,changerrorneg1, changerrorneg2,
changerrorneg3,m1cher,m2cher);
vecpertchangerror[1]=pertenenciadelcambioneg;

//DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL CAMBIO DEL ERROR SI ESTA DENTRO
DEL CONJUNTO CERO

pertenenciadelcambiozero=calpertenencia(band5,cambiodelerror,changerrorzero1, changerrorzero2,
changerrorzero3,m3cher,m4cher);
vecpertchangerror[2]=pertenenciadelcambiozero;

```

//DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL CAMBIO DEL ERROR SI ESTA DENTRO DEL CONJUNTO POSITIVO

```
pertenenciadelcambipost=calpertenencia(band6,cambiodelerror,changerrorpost1, changerrorpost2 ,
changerrorpost3,m5cher,m6cher);
vecpertchangerror[3]=pertenenciadelcambipost;
```

//IDENTIFICA LAS REGLAS QUE SE ACTIVAN

```
for (i=1; i<4; i++)
{
  for (j=1; j<4; j++)
  {
    if( vecperterror[i] < vecpertchangerror[j] )
    {
      newvectorper[z]= vecperterror[i];
    }
    else
    {
      newvectorper[z]= vecpertchangerror[j];
    }
  }
  z=z+1;
}
z=1;
```

// REALIZA EL PROCESO DE INFERENCIA DE LAS REGLAS, A TRAVES DEL METODO DE RSS ROOT SQUARE SUM

```
inferenciacerrar= pow(newvectorper[1],2)+pow(newvectorper[2],2)+pow(newvectorper[4],2);
inferenciacerrar= pow(inferenciacerrar,0.5);
inferencianooperar= pow(newvectorper[3],2)+pow(newvectorper[5],2)+pow(newvectorper[7],2);
inferencianooperar= pow(inferencianooperar,0.5);
inferenciaabrir= pow(newvectorper[6],2)+pow(newvectorper[8],2)+pow(newvectorper[9],2);
inferenciaabrir= pow(inferenciaabrir,0.5);
```

//ACA SE DIBUJA LOS RESULTADOS DE LAS INFERENCIAS

```
case2cerr=((inferenciacerrar-1)/m2corr)+corrcerrar2;
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, -2, inferenciacerrar, case2cerr,
inferenciacerrar, VAL_RED);
contplot=contplot+1;
case1nop=((inferencianooperar-1)/m3corr)+cormnooperar2;
case2nop=((inferencianooperar-1)/m4corr)+cormnooperar2;
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, case1nop, inferencianooperar,
case2nop, inferencianooperar, VAL_GREEN);
contplot=contplot+1;
case1abr=((inferenciaabrir-1)/m5corr)+corrabrir2;
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, case1abr, inferenciaabrir, 2,
inferenciaabrir, VAL_BLUE);
contplot=contplot+1;
```

// DEFUZZIFICACIÓN POR MEDIA DE CENTROS

```
if (metodo == 0)
{
  defuzificado= (corrcerrar2*inferenciacerrar) +(cormnooperar2*inferencianooperar) +
(corrabrir2*inferenciaabrir);
  defuzificado= defuzificado/(inferenciacerrar+inferencianooperar+inferenciaabrir);
}
```

//2. DEFUZIFICACION POR CENTRO DE GRAVEDAD PONDERADO POR EL AREA (CGPA)

```
if (metodo == 1)
{
CGCC=(3*pow(correrrar1,2))-(2*pow(case2cerr,2))+pow(correrrar3,2)-(2*case2cerr*correrrar3);
DVCGCC= (3*((2*correrrar1)-case2cerr-correrrar3));
CGCC=(CGCC / DVCGCC);
CGCNO=0;
CGCAB= (3*pow(corrabrir3,2))-(2*pow(case1abr,2))+pow(corrabrir1,2)-(2*case1abr*corrabrir1);
DVCGCAB= (3*((2*corrabrir3)-case1abr-corrabrir1));
CGCAB=CGCAB / DVCGCAB;
ACC= (correrrar3+case2cerr-(2*correrrar1))*inferenciacerrar;
ACNOP= (cornnooperar3+case2nop-case1nop-cornnooperar1)*inferencianooperar;
ACAB= ((2*corrabrir3)-case1abr-corrabrir1)*inferenciaabrir;
defuzificado=(CGCC*ACC)+(CGCNO*ACNOP)+(CGCAB*ACAB);
defuzificado= defuzificado/(ACC+ACNOP+ACAB);
}
```

// 3. DEFUZIFICACION POR CENTRO DE GRAVEDAD PONDERADO POR ALTURA (CGPAT)

```
if (metodo == 2)
{
CGCC=(3*pow(correrrar1,2))-(2*pow(case2cerr,2))+pow(correrrar3,2)-(2*case2cerr*correrrar3);
DVCGCC= (3*((2*correrrar1)-case2cerr-correrrar3));
CGCC=CGCC / DVCGCC;
CGCNO=0;
CGCAB= (3*pow(corrabrir3,2))-(2*pow(case1abr,2))+pow(corrabrir1,2)-(2*case1abr*corrabrir1);
DVCGCAB= (3*((2*corrabrir3)-case1abr-corrabrir1));
CGCAB=CGCAB / DVCGCAB;
defuzificado=(CGCC*inferenciacerrar)+(CGCNO*inferencianooperar)+(CGCAB*inferenciaabrir);
defuzificado= defuzificado/(inferenciacerrar+inferencianooperar+inferenciaabrir);
}
```

// 4. DEFUZIFICACION POR PUNTO MAXIMO DE CRITERIO PONDERADO POR EL AREA (PMCPA)

```
if (metodo == 3)
{
PMCCERR=case2cerr;
PMCABIR=case1abr;
ACC= (correrrar3+case2cerr-(2*correrrar1))*inferenciacerrar;
ACNOP= (cornnooperar3+case2nop-case1nop-cornnooperar1)*inferencianooperar;
ACAB= ((2*corrabrir3)-case1abr-corrabrir1)*inferenciaabrir;
defuzificado=(PMCCERR*ACC)+(0*ACNOP)+(PMCABIR*ACAB);
defuzificado= defuzificado/(ACC+ACNOP+ACAB);
}
```

// 5. DEFUZIFICACION POR PUNTO MAXIMO DE CRITERIO PONDERADO POR ALTURA (PMCPAT)

```
if (metodo == 4)
{
PMCCERR=case2cerr;
PMCABIR=case1abr;
defuzificado=(PMCCERR*inferenciacerrar)+(0*inferencianooperar)+(PMCABIR*inferenciaabrir);
defuzificado= defuzificado/(inferenciacerrar+inferencianooperar+inferenciaabrir);
}
```

```

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA, defuzificado, 0, defuzificado, 1,
          VAL_BLACK);
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CORRIENTE_2, defuzificado);
corri=defuzificadocero-defuzificado;
if (corri < 0)
corri=0;
Escribircorriente(corri);
}
    if (corri > 20)
    {
    corri=20;
    Escribircorriente(corri);
    }
    else
    {
    Escribircorriente(corri);
    }
    contplot=contplot+1;
    case3=1;
    }
}
break;
}
return 0;
}

```

// FUNCION QUE ES LLAMADA POR EL TIMER DE TEMPERATURA Y REALIZA EL CONTROL DE TEMPERATURA

```

int CVICALLBACK TIMER_TEMP (int panel, int control, int event,
                             void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    switch (event)
    {
    case EVENT_TIMER_TICK:
    GetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CONTROL_RATE_TEMP, &controlRatetemp);
    SetCtrlAttribute (panelSal, PANEL_SAL_TIMER_TEMP, ATTR_INTERVAL,controlRatetemp);
    GetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CONTROL_TEMP, &controltemp);
    if (controltemp)
    {
    ntemp=ntemp+1;

```

// TOMA EL VALOR DE CONSIGNA DEL CAUDAL

```

GetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_SET_POINT_TEMP, &setpointtemp);

```

//LLAMA LA FUNCION LEERTEMPER Y CALCULA EL ERROR

```

errortemp=LeerTemper(setpointtemp);
if (ntemp > 2)
{

```

// CALCULA EL CAMBIO DEL ERROR EN EL TIEMPO

```

cambiodelerrortemp= (errortemp-errorcerotemp)/controlRatetemp;
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CAMBIO_DEL_ERROR_TEMP,cambiodelerrortemp);

```

// DIBUJA LAS ENTRADAS DEL CONTROLADOR

```

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, cambiodelerrortemp, 1,

```

```

        cambiodelerrortemp, 0, VAL_DK_MAGENTA);
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, errortemp, 1,errortemp, 0,
        VAL_DK_MAGENTA);
contplot2temp=contplot2temp+1;
errorcerotemp=errortemp;

// BORRA LAS ULTIMAS ENTRDAS DEL CONTROLADOR Y LA ULTIMA RESPUESTA

if (case3temp)
{
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP,contplottemp-3,
        VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, contplottemp-2,
        VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, contplottemp-1,
        VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, contplottemp,
        VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR_TEMP, contplot2temp-1,
        VAL_IMMEDIATE_DRAW);
DeleteGraphPlot (panelGraf, PANEL_GRAF_CAMBIO_DE_ERROR_TEMP, contplot2temp-1,
        VAL_IMMEDIATE_DRAW);
}

//IDENTIFICA LOS CONJUNTOS EN LOS QUE SE ENCUENTRA EL ERROR DE LA
TEMPERATURA

determinarconjunto (errortemp,errorneg1temp,errorneg3temp,errorzero1temp, errorzero3temp,
        errorpost1temp,errorpost3temp);
band1temp=errornegtemp; band2temp=errorzerotemp;band3temp=errorposttemp;

//DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL ERROR DE LA TEMPERATURA SI
ESTA DENTRO DEL CONJUNTO NEGATIVO

pertenencianegtemp= calpertenencia(band1temp,errortemp,errorneg1temp, errorneg2temp,
        errorneg3temp,m1ertemp,m2ertemp);
vecpererrortemp[1]=pertenencianegtemp;

//DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL ERROR DE LA TEMPERATURA SI ESTA
DENTRO DEL CONJUNTO CERO

pertenenciazerotemp= calpertenencia (band2temp,errortemp,errorzero1temp, errorzero2temp,
        errorzero3temp,m3ertemp,m4ertemp);
vecpererrortemp[2]=pertenenciazerotemp;

// DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL ERROR DE LA TEMPERATURA SI ESTA
DENTRO DEL CONJUNTO POSITIVO

pertenenciaposttemp= calpertenencia(band3temp,errortemp,errorpost1temp, errorpost2temp,
        errorpost3temp,m5ertemp,m6ertemp);
vecpererrortemp[3]=pertenenciaposttemp;

// IDENTIFICA LOS CONJUNTOS EN LOS QUE ESTA EL CAMBIO DEL ERROR DE LA
TEMPERATURA

determinarconjunto (cambiodelerrortemp,changerrorneg1temp,changerrorneg3temp,
        changerrorzero1temp,changerrorzero3temp,changerrorpost1temp,
        changerrorpost3temp);
band4temp=errornegtemp;band5temp=errorzerotemp;band6temp=errorposttemp;

```

// DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL CAMBIO DEL ERROR DE LA TEMPERATURA SI ESTA DENTRO DEL CONJUNTO NEGATIVO

```
pertenenciadelcambionegtemp=calpertenencia(band4temp,cambiodelerrortemp,  
      changerroneg1temp,changerroneg2temp,changerroneg3temp,  
      m1chertemp,m2chertemp);  
vecpertchangerrortemp[1]=pertenenciadelcambionegtemp;
```

// DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL CAMBIO DEL ERROR DE LA TEMPERATURA SI ESTA DENTRO DEL CONJUNTO CERO

```
pertenenciadelcambiozerotemp=calpertenencia(band5temp,cambiodelerrortemp,  
      changerrorzero1temp,changerrorzero2temp,changerrorzero3temp,  
      m3chertemp,m4chertemp);  
vecpertchangerrortemp[2]=pertenenciadelcambiozerotemp;
```

DETERMINA EL GRADO DE PERTENENCIA DEL CAMBIO DEL ERROR DE LA TEMPERATURA SI ESTA DENTRO DEL CONJUNTO POSITIVO

```
pertenenciadelcambioposttemp=calpertenencia(band6temp,cambiodelerrortemp,  
      changerrorpost1temp,changerrorpost2temp,changerrorpost3temp,  
      m5chertemp,m6chertemp);  
vecpertchangerrortemp[3]=pertenenciadelcambioposttemp;
```

//IDENTIFICA LAS REGLAS QUE SE ACTIVAN

```
for (itemp=1; itemp<4; itemp++)  
{  
  for (jtemp=1; jtemp<4; jtemp++)  
  {  
    if( vecperterrortemp[itemp] < vecpertchangerrortemp[jtemp] )  
    {  
      newvectorpertemp[ztemp]= vecperterrortemp[itemp];  
    }  
    else  
    {  
      newvectorpertemp[ztemp]= vecpertchangerrortemp[jtemp];  
    }  
    ztemp=ztemp+1;  
  }  
}  
ztemp=1;
```

//INICIA LA INFERENCIA POR EL METODO RRS (RAIZA DE LA SUMA DE LOS CUADRADOS)

```
inferenciacerrartemp= pow(newvectorpertemp[6],2)+pow(newvectorpertemp[8],2)  
      +pow(newvectorpertemp[9],2);  
inferenciacerrartemp= pow(inferenciacerrartemp,0.5);  
inferencianooperartemp= pow(newvectorpertemp[3],2)+pow(newvectorpertemp[5],2)  
      +pow(newvectorpertemp[7],2);  
inferencianooperartemp= pow(inferencianooperartemp,0.5);  
inferenciaabrirtemp= pow(newvectorpertemp[1],2)+pow(newvectorpertemp[2],2)  
      +pow(newvectorpertemp[4],2);  
inferenciaabrirtemp= pow(inferenciaabrirtemp,0.5);
```

//ACA SE INICIA EL PROCESO DE DIBUJAR LOS RESULTADOS DE LA INFERENCIA

```
case2tempcerr=((inferenciacerrartemp-1)/m2corrtemp)+corrcerrar2temp;
```

```

PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, -2, inferenciacerrartemp,
          case2tempcerr, inferenciacerrartemp, VAL_RED);
contplottemp=contplottemp+1;
case1tempnop=((inferencianooperartemp-1)/m3corrtemp)+corrnooperar2temp;
case2tempnop=((inferencianooperartemp-1)/m4corrtemp)+corrnooperar2temp;
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, case1tempnop,
          inferencianooperartemp, case2tempnop, inferencianooperartemp, VAL_GREEN);
contplottemp=contplottemp+1;
case1tempabr=((inferenciaabrirtemp-1)/m5corrtemp)+corrabrir2temp;
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, case1tempabr,
          inferenciaabrirtemp, 2, inferenciaabrirtemp, VAL_BLUE);
contplottemp=contplottemp+1;

```

// METODO DE DEFUZICACION POR MEDIA DE CENTROS

```

if (metodo == 0)
{
defuzificadotemp= (correrrar2temp*inferenciacerrartemp)+(corrnooperar2temp
                  *inferencianooperartemp)+(corrabrir2temp*inferenciaabrirtemp);
defuzificadotemp= defuzificadotemp/(inferenciacerrartemp+inferencianooperartemp
                  +inferenciaabrirtemp);
}

```

// 2. DEFUZIFICACION POR CENTRO DE GRAVEDAD PONDERADO POR EL AREA (CGPA)

```

if (metodo == 1)
{
CGCCTEM=(3*pow(correrrar1temp,2))-(2*pow(case2tempcerr,2))+(pow(correrrar3temp,2))
          -(2*case2tempcerr*correrrar3temp);
DVCGCCTEM= (3*((2*correrrar1temp)-case2tempcerr-correrrar3temp));
CGCCTEM=CGCCTEM / DVCGCCTEM;
CGCNOPTEM=0;
CGCABTEM= (3*pow(corrabrir3temp,2))-(2*pow(case1tempabr,2))+(pow(corrabrir1temp,2))
          -(2*case1tempabr*corrabrir1temp);
DVCGCABTEM= (3*((2*corrabrir3temp)-case1tempabr-corrabrir1temp));
CGCABTEM=CGCABTEM / DVCGCABTEM;
ACCTEM= (correrrar3temp+case2tempcerr-(2*correrrar1temp))*inferenciacerrartemp;
ACNOPTEM= (corrnooperar3temp+case2tempnop-case1tempnop-corrnooperar1temp)
          *inferencianooperartemp;
ACABTEM= ((2*corrabrir3temp)-case1tempabr-corrabrir1temp)*inferenciaabrirtemp;
defuzificadotemp=(CGCCTEM*ACCTEM) + (CGCNOPTEM*ACNOPTEM)+
                  (CGCABTEM*ACABTEM);
defuzificadotemp= defuzificadotemp/(ACCTEM+ACNOPTEM+ACABTEM);
}

```

// 3. DEFUZIFICACION POR CENTRO DE GRAVEDAD PONDERADO POR ALTURA (CGPAT)

```

if (metodo == 2)
{
CGCCTEM=(3*pow(correrrar1temp,2))-(2*pow(case2tempcerr,2))+(pow(correrrar3temp,2))
          -(2*case2tempcerr*correrrar3temp);
DVCGCCTEM= (3*((2*correrrar1temp)-case2tempcerr-correrrar3temp));
CGCCTEM=CGCCTEM / DVCGCCTEM;
CGCNOPTEM=0;
CGCABTEM= (3*pow(corrabrir3temp,2))-(2*pow(case1tempabr,2))+(pow(corrabrir1temp,2))
          -(2*case1tempabr*corrabrir1temp);
DVCGCABTEM= (3*((2*corrabrir3temp)-case1tempabr-corrabrir1temp));

```

```

CGCABTEM=CGCABTEM / DVCGCABTEM;

defuzificadotemp=(CGCCTEM*inferenciacerrartemp)+(CGCNOPTTEM*inferencianooperartemp)
                +(CGCABTEM*inferenciaabrirtemp);
defuzificadotemp= defuzificadotemp/(inferenciacerrartemp+ inferencianooperartemp
                +inferenciaabrirtemp);
}

// 4. DEFUZIFICACION POR PUNTO MAXIMO DE CRITERIO PONDERADO POR EL AREA
(PMCPA)

if (metodo == 3)
{
PMCCERRTEM=case2tempcerr;
PMCABIRTEM=case1tempabr;
ACCTEM= (correrrar3temp+case2tempcerr-(2*correrrar1temp))*inferenciacerrartemp;
ACNOPTTEM= (cornnooperar3temp+case2tempnop-case1tempnop-cornnooperar1temp)
            *inferencianooperartemp;
ACABTEM= ((2*corrabrir3temp)-case1tempabr-corrabrir1temp)*inferenciaabrirtemp;
defuzificadotemp=(PMCCERRTEM*ACCTEM)+(case2tempnop*ACNOPTTEM)+(PMCABIRTEM
            *ACABTEM);
defuzificadotemp= defuzificadotemp/(ACCTEM+ACNOPTTEM+ACABTEM);
}

// 5. DEFUZIFICACION POR PUNTO MAXIMO DE CRITERIO PONDERADO POR ALTURA
(PMCPAT)

if (metodo == 4)
{
PMCCERRTEM=case2tempcerr;
PMCABIRTEM=case1tempabr;
defuzificadotemp=(PMCCERRTEM*inferenciacerrartemp)+(case2tempnop
            *inferencianooperartemp)+(PMCABIRTEM*inferenciaabrirtemp);
defuzificadotemp= defuzificadotemp/ (inferenciacerrartemp +inferencianooperartemp
            +inferenciaabrirtemp);
}
PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_SALIDA_TEMP, defuzificadotemp, 0,
            defuzificadotemp, 1, VAL_BLACK);
SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_CORRIENTE_FUZZY_TEMP, defuzificadotemp);
defuzificadotemp=defuzificadocerotemp+defuzificadotemp;
if (defuzificadotemp < 0)
{
defuzificadotemp=0;
Escribircorrienteval2(defuzificadotemp);
}
if (defuzificadotemp > 20)
{
defuzificadotemp=20;
Escribircorrienteval2(defuzificadotemp);
}
else
{
Escribircorrienteval2(defuzificadotemp);
}
contplottemp=contplottemp+1;
case3temp=1;
}
}
break;
}

```

```

return 0;
}

// ESTA FUNCION TERMINA EL CONTROL, Y CIERRA EL PANEL DE SALIDA

int CVICALLBACK SALIR (int panel, int control, int event,
                      void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_COMMIT:
QuitUserInterface (0);
break;
}
return 0;
}

// ESTA FUNCION CIERRA EL PANEL DE GRAFICAR

int CVICALLBACK SALIR_SALIDA (int panel, int control, int event,
                              void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_COMMIT:
QuitUserInterface (0);
break;
}
return 0;
}

// ESTA FUNCION CIERRA EL PROGRAMA TOTAL

int CVICALLBACK QUIT (int panel, int control, int event,
                     void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_COMMIT:
for (i=0; i<2; i++)
{

//DESTRUYE CADA TAG CREADO POR CADA CANAL DE TEMPERATURA

status = FP_DestroyIOPoint (IAKhandle, IOhandle[i]);
}

//DESTRUYE LOS TAG TANTO DE LA SALIDA DE CORRIENTE, COMO DEL
CAUDALIMETRO

status = FP_DestroyIOPoint (IAKhandle, timerCntHandle);
status = FP_DestroyIOPoint (IAKhandle, IOPointHandle);
status = FP_Close (IAKhandle);
Error(status);
QuitUserInterface (0);
break; }
return 0;
}

```

SOTWARE DE CONTROL PID

// SE DEFINEN LAS LIBRERIAS A UTILIZAR

```
#include "FieldPoint.h"  
#include <formatio.h>  
#include <cvirte.h>  
#include <ansi_c.h>  
#include <userint.h>  
#include "CAUDALNUEVO.h"
```

// SE DEFINE EL TAMAÑO DEL BUFFER

```
#define BUFFER_SIZE 256
```

//DECLARACION DE VARIABLES DEL FUNCIONAMIENTO DE LOS FIELD POINT

```
static IAStatus status,status2;  
static IATaskID adviseID[4], advise;  
static IABYTE currentTemp[100], advisebuf[100]; //BUFFER  
static IABYTE valu[BUFFER_SIZE],valusegundo[BUFFER_SIZE];  
static IABYTE readBuffer[100];  
static IAHandle IOhandle[4];  
static IAHandle timerCntHandle;  
static IAHandle IOPointHandle;  
static IAHandle IAKhandle, handle;  
static SYSTEMTIME sysTime,timestamp;  
static char itemName[100],itemName2[100],itemName3[100],  
deviceName[100],deviceName2[100],deviceName3[100], resource[100], path[100], pathcmp[100];  
static double controlRate, controlRateTemperatura;  
static int panelHandle, count[4];
```

// DEFINICION DE LAS VARIABLES DEL PROGRAMA

```
static int opcionn, conttemper;  
static int ms,ms1,ms0=0,n=0,nn=0,ciclo=0,ciclodos=0,cont=0,msultimo,caudal;  
static int nullval;  
static int check;  
static float ls,  
setpoint,error,errortemper,integral,derivada,integralcaudal,derivadacaudal,errorAnterior=0,errorant,  
temp,temporal,bandera,banderatwo,temporal0=0,temp0=0,Kp,Kptemp,Kitemp,Kdtemp,setpointemper, val  
uetemporal,kdcaudal,kicaudal;  
static float vectorcaudal[500], vectortemper[500],vectorcorriente2[500];  
static float value;  
static int channel, pnl,pet;  
static char message[256];  
static int quit,i,j,k;
```

// DEFINICION DE LOS ARCHIVOS DE DATOS

```
FILE *datos;  
FILE *datosdos;  
FILE *datostres;  
FILE *datoscuatro;
```

//DECLARACION DE LAS FUNCIONES

```
void Error(IAStatus);
```

```

float Leercaudal(float);
void Escribircorriente (float);
void Escribircorrienteval2 (float);
float LeerTemper (float);

// FUNCION PRINCIPAL

int main (int argc, char *argv[])
{

// SE DEFINE EL NOMBRE DE LOS ARCHIVOS DE DATOS

datos=fopen("caudal.txt","w");
datosdos=fopen("corriente.txt","w");
datostres=fopen("temperatura.txt","w");
datoscuatro=fopen("corrienteval2.txt","w");

// SE CARGA EL PANEL PRINCIPAL

if (InitCVIRTE (0, argv, 0) == 0)
    return -1; /* out of memory */
if ((panelHandle = LoadPanel (0, "CAUDALNUEVO.uir", PANEL)) < 0)
    return -1;

// SE INICIALIZAN TODAS LAS VARIABLES PARA EL FUNCIONAMIENTO DE LOS FIELD
POINT

for (i=0; i<100; i++)
{
    itemName[i] = 0x00;
    itemName2[i] = 0x00;
    itemName3[i] = 0x00;
    deviceName[i] = 0x00;
    deviceName2[i] = 0x00;
    deviceName3[i] = 0x00;
    resource[i] = 0x00;
    path[i] = 0x00;
    pathcmp[i] = 0x00;
    currentTemp[i] = 0x00;
    readBuffer[i] = 0x00;
    advisebuf[i] = 0x00;
}

for (i=0; i<256; i++)
{
    message[i] = 0x00;
}

for (i=0; i<4; i++)
{
    IOhandle[i] = 0x00;
    count[i] = 0;
    adviseID[i] = 0x00;
}

DisplayPanel (panelHandle);
RunUserInterface ();
DiscardPanel (panelHandle);
return 0;
}

```

// FUNCION QUE INICIALIZA EL PROGRAMA, SE ABREN LOS TAGS DE CADA UNO DE LOS DISPOSITIVOS DE LOS FIELD POINT

```
int CVICALLBACK StartCallback (int panel, int control, int event,
                               void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
```

```
{
switch (event)
```

```
{
```

```
case EVENT_COMMIT:
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_IAK_Path, path);
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_RESOURCE_NAME, resource);
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_device_name, deviceName);
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_DECIVE_NAME_2, deviceName2);
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_device_name_3, deviceName3);
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_Control_Rate, &controlRate);
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CONTROL_RATE_TEMPER, &controlRateTemperatura);
```

//REvisa EL PATH, SI EXISTE EL ARCHIVO.IAK, O SI TOMA EL QUE VIENE POR DEFECTO

```
nullval = strcmp (path, pathemp);
```

```
if (!nullval)
```

```
{
```

```
status = FP_Open ("c:/danielrangel.iak", &IAKhandle);
```

```
}
```

```
else
```

```
{
```

```
status = FP_Open (path, &IAKhandle);
```

```
}
```

```
for (i=0; i<2; i++)
```

```
{
```

```
Fmt (itemName, "Channel %i", i);
```

// CREA UN TAG PARA CADA UNO DE LOS CANALES DE TEMPERATURA SELECCIONADOS

```
status = FP_CreateTagIOPoint (IAKhandle, resource, deviceName, itemName,
                              &IOhandle[i]);
```

```
handle = IOhandle[i];
```

```
}
```

```
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_ITEM_NAME_CORRIENTE, itemName2);
```

// CREA EL TAG PARA LA SALIDA DE CORRIENTE

```
if (status = FP_CreateTagIOPoint (IAKhandle, resource, deviceName2, itemName2,
                                  &IOPointHandle))
```

```
{
```

```
Error(status);
```

```
QuitUserInterface (0);
```

```
return(0);
```

```
}
```

```
k=0;
```

```
Fmt (itemName3, "Count Input %i", k);
```

// CREA EL TAG PARA EL CAUDALIMETRO

```
status = FP_CreateTagIOPoint (IAKhandle, resource, deviceName3, itemName3,
```

```

        &timerCntHandle);

// REvisa si se produce algun error

if (status)
{
    Error(status);
    QuitUserInterface (0);
    return(0);
}

// SETEA CADA UNO DE LOS TIMER

SetCtrlAttribute (panelHandle, PANEL_TIMER, ATTR_ENABLED, 1);
SetCtrlAttribute (panelHandle, PANEL_TIMERSECOND, ATTR_ENABLED, 1);
SetCtrlAttribute (panelHandle, PANEL_STARTBUTTON, ATTR_DIMMED, 1);
SetCtrlAttribute (panelHandle, PANEL_QUITBUTTON, ATTR_DIMMED, 0);
break;
}
Return 0;
}

// ESTA ES LA FUNCION QUE TERMINA EL PROGRAMA

int CVICALLBACK Quit (int panel, int control, int event,
                    void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
    switch (event)
    {
        case EVENT_COMMIT:

            SetCtrlAttribute (panelHandle, PANEL_TIMER, ATTR_ENABLED, 0);
            For (i=0; i<2; i++)
            {
                if (count[i])
                {

//DESTRUYE CADA TAG CREADO POR CADA CANAL DE TEMPERATURA

                status = FP_DestroyIOPoint (IAKhandle, IOhandle[i]);
                }
            }

//DESTRUYE LOS TAG TANTO DE LA SALIDA DE CORRIENTE, COMO DEL
CAUDALIMETRO

            status = FP_DestroyIOPoint (IAKhandle, timerCntHandle);
            status = FP_DestroyIOPoint (IAKhandle, IOPointHandle);
            status = FP_Close (IAKhandle);
            Error(status);
            QuitUserInterface (0);
            break;
        }
    }
    return 0;
}

// FUNCION QUE DETECTA SI SE PRODUCE ALGUN ERROR

void Error (IAStatus status)

```

```

    {
    if (status !=0) {
    FP_ErrorMsg (IAKhandle, status, message);
    MessagePopup ("Error", message);
    }
    }

// FUNCION QUE LEE EL CAUDAL Y DEVUELVE EL ERROR

float Leercaudal (float setpoint)
{

status = FP_Read (IAKhandle, timerCntHandle, readBuffer, 100, &timestamp);
ms = *((int*)(readBuffer));
ms1 = ms;
ms = ms1-ms0;
if (ms<0)
{
ms=(ms1+65535)-ms0;
}
ms = ms/controlRate;
ms0= ms1;
ls = ((ms*(1.29028*pow(10,-2)))+0.03349)*60;
fprintf(datos," CAUDAL = %.1f \n ",ls);
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_NUME, ls);
if (n>2)
{
PlotStripChartPoint (panelHandle, PANEL_EVOLU_CAUDAL, ls);
}
error = setpoint-ls;
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_ERROR, error);
return (error);
}

// FUNCION QUE LEE LA TEMPERATURA Y DEVUELVE EL ERROR

float LeerTemper (float setpointemper)
{

//LEE CADA CANAL QUE ESTA CHEQUEADO Y ESCRIBE EL VALOR EN EL PANEL

For (i=0; i<2; i++)
{

//LEE CADA CANAL QUE ESTA CHEQUEADO Y ESCRIBE EL VALOR EN EL PANEL

status = FP_Read (IAKhandle, IOhandle[i], currentTemp, 100, &sysTime);
value = *((float*)(currentTemp));
if (i==1)
{
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_NUMERIC1, value);
PlotStripChartPoint (panelHandle, PANEL_EVOLU_TEMPO, value);
fprintf(datostres," temperatura = %f \n ",value);
errortemper = value - setpointemper;
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_ERROR_TEMPER, errortemper);
}
else
{
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_NUMERIC0, value);
}
}
}

```

```

}
return (errortemper);
}
// FUNCION QUE ESCRIBE LA CORRIENTE DE LA VALVULA DE AGUA

void Escribircorriente (float temp)
{
memcpy (valu, &temp, 4);
memcpy (valu + (4), &temporal, 4);

//Escribe el valor en el modulo

FP_Write (IAKhandle, IOPointHandle, valu, BUFFER_SIZE);
temp=temp/pow(10,-3);
fprintf(datosdos," corriente = %f\n ",temp);
bandera=temporal;
bandera=bandera/pow(10,-3);
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CORRIENTE, temp);
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CORRIENTE_VAL2, bandera);
}

// FUNCION QUE ESCRIBE LA CORRIENTE DE L VALVULA DE VAPOR

void Escribircorrienteval2 (float temporal)
{
memcpy (valu, &temp, 4);
memcpy (valu + (4), &temporal, 4);

//Escribe el valor en el modulo

FP_Write (IAKhandle, IOPointHandle, valu, BUFFER_SIZE);
banderatwo=temp;
banderatwo=banderatwo/pow(10,-3);
temporal=temporal/pow(10,-3);
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CORRIENTE, banderatwo);
SetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CORRIENTE_VAL2, temporal);
fprintf(datoscuatro," corriente val2 = %f\n ",temporal);
}

// FUNCION QUE REALIZA EL CONTROL DE CAUDAL.

int CVICALLBACK timerCB (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_TIMER_TICK:

GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_Control_Rate, &controlRate);
SetCtrlAttribute (panelHandle, PANEL_TIMER, ATTR_INTERVAL,controlRate);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CONTROLCAUDAL, &opcionn);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_Kp, &Kp);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_kd_caudal, &kdcaudal);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_ki_caudal, &kicaudal);
Kp=Kp*pow(10,-4);
Kitemp=Kitemp*pow(10,-4);
Kdtemp=Kdtemp*pow(10,-4);
if (opcionn)
{
n=n+1;

```

```

GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_SET_POINT, &setpoint);
error=Leercaudal(setpoint); //LLAMA LA FUNCION LEERCAUDAL
integralcaudal= (((error-errorant)*controlRate)/2)+(errorant*controlRate);
derivadacaudal= (error-errorant)/controlRate;
temp= temp0 + Kp((error)+(kdcaudal*derivadacaudal)+(kicaudal*integralcaudal));
errorant=error;
if(n>3)
{
temp0=temp;
}
if (temp > 0.02)
{
temp = 0.02;
Escribircorriente(temp);
}
if (temp < 0.00)
{
temp = 0.00;
Escribircorriente(temp);
}
else
{
Escribircorriente(temp);
}
}

if (status == 33489) status = 0; //Ignore Open Thermocouples
if (status)
{
Error(status);
QuitUserInterface (0);
return(0);
}
break;
}
return 0;
}

```

// FUNCION QUE HACE EL CONTROL DE TEMPERATURA

```

int CVICALLBACK TIMERSECOND (int panel, int control, int event,
void *callbackData, int eventData1, int eventData2)
{
switch (event)
{
case EVENT_TIMER_TICK:
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CONTROL_RATE_TEMPER,&controlRateTemperatura);
SetCtrlAttribute (panelHandle,PANEL_TIMERSECOND,
ATTR_INTERVAL,controlRateTemperatura);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_CONTROL_TEMPERATURA, &conttemper);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_KP_TEMPER, &Kptemp);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_Ki, &Kitemp);
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_Kd, &Kdtemp);
Kptemp=Kptemp*pow(10,-4);
Kitemp=Kitemp*pow(10,-4);
Kdtemp=Kdtemp*pow(10,-4);
if (conttemper)
{
GetCtrlVal (panelHandle, PANEL_SET_POINT_TEMPER, &setpointemper);
errortemper=LeerTemper(setpointemper); //LLAMA LA FUNCION LEERCAUDAL

```

```

ciclodos=ciclodos+1;
integral= (((erroremper-errorAnterior)/2)*controlRateTemperatura) -
           (errorAnterior*controlRateTemperatura);
derivada= (erroremper-errorAnterior)/controlRateTemperatura;
temporal= temporal0-Kptemp((*erroremper)+(Kdtemp*derivada)-(Kitemp*integral)
                        -(Kptemp*erroremper));
ErrorAnterior=erroremper;
temporal0=temporal;

```

// EN ESTA PARTE SE ASEGURA QUE LA CORRIENTE QUE ES ENVIADA A LA VALVULA NO SE MAYOR NI MENOR DEL RANGO DE LA SEÑAL DE CONTROL

```

if (temporal > 0.02)
{
    temporal = 0.02;
    temporal0 = 0.02;
    Escribircorrienteval2(temporal);
}
if (temporal < 0.00)
{
    temporal = 0.00;
    temporal0 = 0;
    Escribircorrienteval2(temporal);
}
else
{
    Escribircorrienteval2(temporal);
}
}
break;
}
return 0;
}

```

ANEXO

ALGUNAS INSTRUCCIONES IMPORTANTES UTILIZADAS EN LOS SOFTWARE DE CONTROL DESARROLLADOS EN AMBIENTES LABWINDOWS

Lo primero que se debe tener en cuenta al elaborar un programa en ambiente Labwindows, es construir su interfase grafica, identificando los controles a utilizar, identificando la función de cada uno de los controles, y la funciones a diseñar, de acuerdo a la finalidad de su programa.

Una vez diseñada y creada la interfase grafica, se procede a generar el código, y se empieza a organizar las instrucciones necesarias para el correcto funcionamiento del software.

Una de las primeras cosas que se debe tener en cuenta, son las librerías que se necesitan, y de deben incluir en el programa a desarrollar.

Para nuestro caso la librería `#include "FieldPoint.h"` , que es la que maneja la comunicación de los field point.

De igual forma la librería `#include <ansi_c.h>` , pues es la que nos permite desarrollar operaciones matemáticas, como suma, multiplicación y nos permite, guardar los datos en archivos adjuntos, nos permite utilizar algunas instrucciones en lenguaje ANSI_C, que se utilizaron dentro del programa.

Las librerías `#include <formatio.h> #include <cvirte.h> #include <userint.h>`, que son las que salen por defecto. Y la inclusión del archivo `#include "ULTIMO PROGRAMA FUZZY.h"`, en el cual se declaran todas las funciones a utilizar y las variables de los controles construidos en la interfase grafica.

Luego de esto, y algo que es muy importante es el declarar las variables de cada uno de los paneles que se van a utilizar, pues a través de esta variable, se tiene acceso a dicho panel, y se puede manejar todos los controles que dentro de el actúan.

Ejemplo : `static int panelUno,panelSal,panelGraf;`

En el ejemplo declaramos tres variables de tres paneles diferentes, que utilizamos en el software de control difuso. Panel Uno, Panel Salida, y Panel Graficar.

Existen algunas instrucciones importantes, que hay que conocer bien, y tener presentes en el momento de realizar algún programa de adquisición de datos a través de field point, y en un ambiente Labwindows.

1. FP_Open ("c:/danielrangel.iaak", &IAKhandle);

Esta instrucción es la encargada de abrir una sesión con el servidor del FieldPoint, es decir abre el archivo de extensión (.IAK), que se crea al momento de configurar los field Point a través del Measurement And Automation. que para este caso específico es "c:/danielrangel.iaak".

El primer elemento de la instrucción es una variable tipo string que contiene la dirección y el nombre del archivo .IAK, en cual contiene la información de la configuración de los field point.

El segundo elemento de la instrucción es una variable de tipo IAHandle mediante las cuales se crea los Server Handles.

2. k=0;
 Fmt (itemName3, "Count Input %i", k);

A través de esta instrucción, se puede seleccionar el channel del dispositivo que se va a utilizar. Para este caso específico, estamos utilizando el Count input 0, del modulo FP-CTR-500. Mediante esta instrucción podemos almacenar el nombre del channel en la variable itemName, para poderla utilizar mas adelante. Para el caso de las termocuplas, la instrucción seria de la siguiente forma:

```
for (i=0; i<2; i++)  
{  
  Fmt (itemName, "Channel %i", i);  
}
```

Es decir, se guardara en la variable itemName, el channel a utilizar, ya sea el 0 o el 1, dependiendo del valor que adquiera i dentro del for. Para cuando se necesiten trabajar con más canales, lo único que necesita es aumentar los límites de la instrucción repetitiva (for).

3. FP_CreateTagIOPoint (IAKhandle, resource, deviceName, itemName,
 &IOhandle[i]);

Esta función crea un punto de entrada o salida (I/O Point), que representa un registro, un tiempo, una sección de memoria y cualquier otro dato que el dispositivo use en la información de su configuración. El primer elemento de la instrucción es una variable de tipo IAHandle mediante las cuales se crea los Server Handles. El segundo elemento es el nombre de la fuente de comunicación que se configura en el Measurement and Automation. El tercer elemento es el nombre del dispositivo al cual se le crea el I/O Point. El cuarto elemento es el nombre del item en el cual el dispositivo va a trabajar (Channel 0,1,2...), esto viene ya introducido en la variable itemName, a través de la instrucción explicada anteriormente. Y el quinto y último elemento, es otra variable de tipo IAHandle, en la cual se almacena la información del I/O Point, la cual se utiliza para leer o escribir datos en los dispositivos. Para este caso

especifico, en nuestro programa utilizamos IOhandle[i], para el Tag de las termocuplas, por lo cual necesitamos esta variable en el momento de querer leer la temperatura en determinado momento.

4. GetCtrlVal (panelUno, PANEL_UNO_IAK_Path, path);

Esta función le permite, obtener o leer un valor de un control que se encuentra en la interfase grafica, y que puede ser utilizado para cualquier función del programa.

Para este caso especifico, se esta leyendo lo que se encuentra en el control PANEL_UNO_IAK_Path, que esta ubicado en el Panel uno, (Esto se sabe por la constante del panel panelUno), y lo esta guardando en una variable denominada path, la cual le permitirá trabajar con esta información sin ningun tipo de problema.

5. PlotLine (panelGraf, PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR, errorneg1, 1, errorneg2, 1, VAL_RED);

Esta instrucción permite dibujar un línea recta en un control de grafica (PANEL_GRAF_CONJUNTOS_ERROR), que esta ubicado en el panel Graficar (panelGraf). A este se le dan los valores de (x1,y1) y (x2,y2), para nuestro caso, (errorneg1,1) y (errorneg2,1). De igual forma esta instrucción le permite escoger el color en la cual se quiere dibujar la línea.

6. FP_Read (IAKhandle, IOhandle[i], currentTemp, 100, &sysTime);

Esta función es la encargada de leer el valor del punto de entrada o salida especificado. En ella se puede observar 5 elementos que se explican a continuación. El primer elemento es la variable tipo IAHandle mediante las cuales se crea los Server Handles. El segundo elemento es la variable tipo IAHandle, en la cual se almacena la información del I/O Point, la cual se utiliza para leer o escribir datos en los dispositivos. El tercer elemento es el buffer donde se almacena la información leída y debe ser definida como una variable de tipo IABYTE. El cuarto elemento es el tamaño máximo del buffer de almacenamiento. Y el quinto elemento es una variable de tipo SYSTEMTIME, la cual almacena el tiempo en el cual el valor es leído.

7. Value = *((float*)(currentTemp));

Esta instrucción es utilizada para poder guardar el dato capturado mediante la instrucción FP_Read, en una variable de tipo Float, para nuestro caso. Esto se hace con la intención de poder trabajar sin ningun problema con este valor. El primer elemento de esta instrucción es el tipo de variable a la cual se va a convertir, y el segundo elemento es el buffer en el cual se encuentra el valor capturado.

8. SetCtrlVal (panelSal, PANEL_SAL_TEMP_DE_SALIDA, value);

Esta instrucción es la utilizada para escribir un valor en un control determinado en la interfase grafica. Utiliza tres elementos, el primero, la constante del panel en el cual se encuentra el control, el segundo, el nombre del control en la cual sera escrito el valor, y el tercer elemento la variable que contiene el valor a escribir.

9. memcpy (valu, &temp, 4)

Esta instrucción es la que se encarga de acomodar de una forma adecuada la variable que será utilizada en la instrucción FP_WRITE, para escribir o exportar un valor a través de los módulos de salidas análogas.

Es decir la variable valu, para este caso, es la variable que se esta acomodando para ser exportada a través del modulo; esta variable debe contener todos los valores que se quieran escribir, y esto se hace mediante un corrimiento hacia la derecha de 4 bits de los valores de la variable temp, que contiene la cantidad requerida.

```
memcpy (valu + (4), &temporal, 4);
```

Aca observamos un nuevo valor que también será escrito por medio de la variable valu, pero como el valor que estaba almacenado en la variable temp, ya esta ocupando los 4 primeros bits de la variable valu, debemos sumar en cuatro bits, para poder acomodar el nuevo valor a escribir que es el que contiene la variable temporal.

Una vez organizado esto, se procede a la instrucción que permite sacar dichos valores a través del modulo de salidas análogas.

10. FP_Write (IAKhandle, IOPointHandle, valu, BUFFER_SIZE);

Esta es la instruccion que escribe un valor determinado, que se encuentra guardado en la variable valu, una vez desarrollado la instrucción número 9.

Nuevamente esta instrucción tiene 4 elementos, el primero una variable de tipo IAHandle mediante las cuales se crea los Server Handles. El segundo elemento es la variable tipo IAHandle, en la cual se almacena la información del I/O Point, la cual se utiliza para leer o escribir datos en los dispositivos. El tercer elemento es el buffer donde se almacena la información que va a ser escrita y debe ser definida como una variable de tipo IAByte. El cuarto elemento es el tamaño máximo del buffer de almacenamiento.

11. FP_DestroyIOPoint (IAKhandle, IOPointHandle);

Ya para concluir con esta serie de instrucciones de importancia para el manejo de los fieldpoint, una vez se termine de trabajar con estos, se debe destruir el I/O Point. Esto se realiza a través de la anterior instrucción.

ANEXO DISEÑO DEL CONTROLADOR PID

El control de temperatura consta básicamente de dos elementos, la válvula de control y el sensor encargado de la medición de la temperatura, termocupla tipo K, cuenta también con la acción de un controlador PID.

Las funciones de transferencia de cada uno de los dispositivos citados en el párrafo anterior esta dada por:

- Válvula de control

$$V(s) = \frac{K_v}{T_v s + 1}$$

Donde K_v corresponde a la ganancia de la válvula y T_v es la constante de tiempo del actuador de la válvula.

La función de transferencia de la válvula de control establece la relación entre la cantidad de caudal que pasa por la válvula y el porcentaje de abertura que esta presente, tomando como variable de salida el fluido, y como variable de entrada el porcentaje de abertura de la válvula.

- Termocupla (Tipo K)

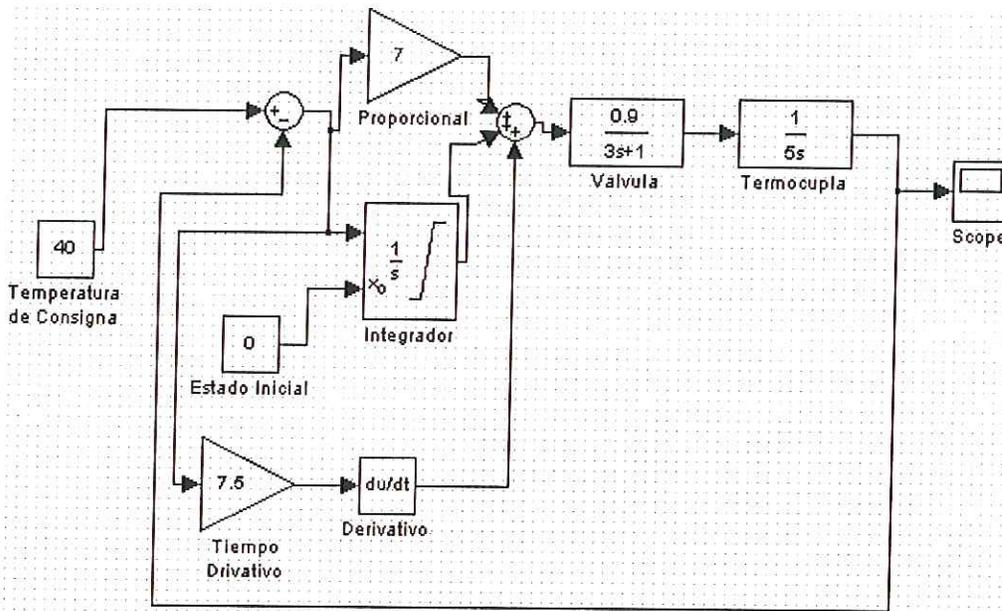
$$P(s) = \frac{1}{hAs} = \frac{1}{T_t s}$$

Donde h es el coeficiente de transferencia de calor por convección, A es el área de contacto entre el agua y el material del que esta hecho el termopozo, para este caso es el cobre, también se puede ver en la ecuación que el producto de los dos factores descritos anteriormente equivale a la constante de tiempo de la termocupla.

La función de transferencia de la termocupla establece la relación entre la cantidad de calor transferida por convección del agua hacia el termopozo y la temperatura que la termocupla capta del este mismo, teniendo como variable de salida la temperatura, y como variable de entrada la cantidad de calor transferida.

Para poder realizar la simulación del sistema, teniendo en cuenta que dentro de las funciones de transferencia influyen muchas constantes, se remplazaron estas por datos facilitados por el fabricante en lo que respecta a la válvula de control, y para las termocuplas se tomo como constante de tiempo, el intervalo que se tomara como control rate o tiempo de adquisición de las mediciones hechas por los sensores.

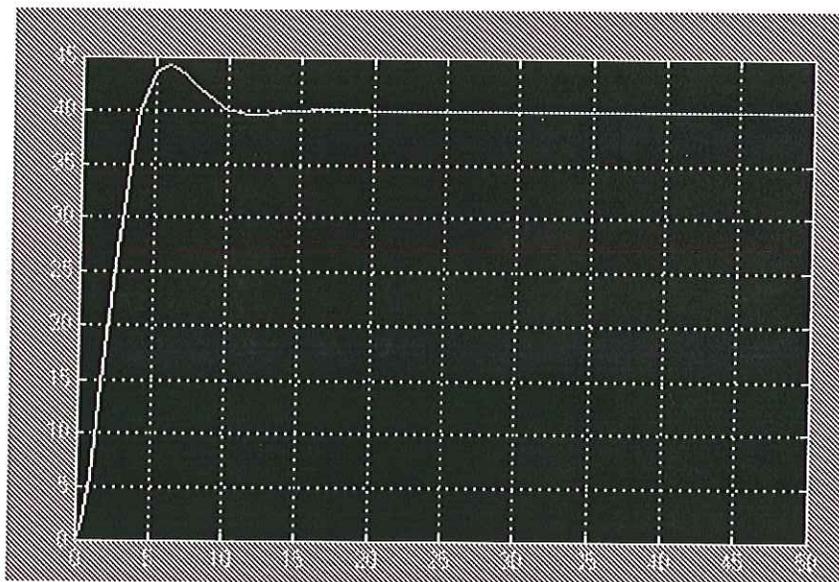
El diagrama de bloques del sistema, con el controlador PID implementado queda de la siguiente manera:



Control de temperatura con el controlador PID

La función de transferencia del sistema en tiempo continuo de la figura anterior esta dada por la siguiente expresión:

$$G(s) = \frac{472.5s^2 + 63s + 6.3}{150s^3 + 50s^2}$$



Respuesta del control PID de temperatura

Discretización del sistema

Para realizar la discretización del sistema, le aplicamos la transformada z a la función de transferencia de este en tiempo continuo. La función de transferencia del sistema en tiempo discreto esta dada por la siguiente expresión:

$$G(z) = \frac{0.516z^3 - 0.143z^2 + 0.3z + 0.053}{z^4 - 1.8528z^3 + 1.5903z^2 - 0.6643z + 0.053}$$

La respuesta del sistema en tiempo discreto ante un escalón unitario se muestra en la siguiente figura:

