



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA
BASADO EN LÓGICA DIFUSA APLICADO AL SISTEMA DE
ENFRIAMIENTO DEL LÁSER DE UNA MÁQUINA DE CORTE
CNC

TRABAJO DE TITULACIÓN

Tipo: PROYECTO TÉCNICO

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERA EN ELECTRÓNICA, CONTROL Y REDES
INDUSTRIALES

AUTORAS: SILVIA ELIZABETH CUENCA RAMOS
JANETH ALEXANDRA YUMBILLO MOROCHO

TUTOR: ING. PABLO EDUARDO LOZADA YÁNEZ

Riobamba-Ecuador

2018

© **2018**, Silvia Elizabeth Cuenca Ramos; Janeth Alexandra Yumbillo Morocho.

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA
ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y
REDES INDUSTRIALES

El Tribunal de titulación certifica que: El trabajo de investigación: “CONSTRUCCIÓN DE UN CONTROLADOR DE TEMPERATURA BASADO EN LÓGICA DIFUSA APLICADO AL SISTEMA DE ENFRIAMIENTO DEL LÁSER DE UNA MÁQUINA DE CORTE CNC”, de responsabilidad de las señoritas SILVIA ELIZABETH CUENCA RAMOS Y JANETH ALEXANDRA YUMBILLO MOROCHO, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del trabajo de titulación, quedando autorizada su presentación.

	FIRMA	FECHA
Dr. Julio Roberto Santillán Castillo. VICEDECANO DE LA FACULTAD DE INFORMÁTICA Y ELECTRÓNICA	_____	_____
Ing. Freddy Enrique Chávez Vásquez DIRECTOR DE LA ESCUELA DE INGENIERÍA ELECTRÓNICA EN CONTROL Y REDES INDUSTRIALES	_____	_____
Ing. Pablo Eduardo Lozada Yánez DIRECTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	_____	_____
Ing. Jorge Luis Hernández Ambato MIEMBRO DEL TRIBUNAL	_____	_____

Nosotras, Silvia Elizabeth Cuenca Ramos, Janeth Alexandra Yumbillo Morocho, somos responsables de las ideas, doctrinas y resultados expuestos en este proyecto de titulación, y el patrimonio intelectual de la misma pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, noviembre de 2018

Silvia Elizabeth Cuenca Ramos
171444726-3

Janeth Alexandra Yumbillo Morocho
060485521-3

DEDICATORIA

El presente trabajo de titulación dedico a mis queridos padres que con su cariño y afecto siempre estuvieron con palabras de aliento y apoyo incondicional para que pueda culminar mí más anhelado sueño. A mis amores Willian y Alejandro que son el pilar fundamental en mi vida por su amor, cariño y paciencia durante el transcurso de mi carrera y por enseñarme a luchar por mis sueños y nunca dejarme rendir. A mis hermanos por ser parte importante en mi vida por darme su cariño y comprensión cuando más lo necesitaba. A mí querida ñaña Lilian que siempre estuvo a mi lado como mi segunda madre apoyándome incondicionalmente con su amor infinito.

Silvia Elizabeth Cuenca Ramos

Dedico este logro a mi madre por ser el mejor regalo que me ha dado la vida, por todo el apoyo y amor con el que me ha sabido fortalecer aún a la distancia. A mi hermana por ser mi amiga incondicional y creer siempre en mí. A mi padre por haber estado presto permanentemente a darme su apoyo.

Janeth Alexandra Yumbillo Morocho

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios todo poderoso que me acompañó y me guió en el transcurso de este camino. A mi querida amiga y compañera de tesis que gracias a su apoyo, comprensión y palabras de motivación que me ayudó a seguir en los momentos más difíciles y sobre todo por brindarme su amistad. A los docentes que gracias a su ayuda y guía se pudo culminar con este trabajo. A mis familiares que siempre estuvieron cuando más los necesite con su apoyo y cariño incondicional. A mis amig@s por los momentos que pasamos juntos por las vivencias compartidas que han hecho que esta etapa de mi vida sea una de las más gratas e inolvidables.

Silvia Elizabeth Cuenca Ramos

Agradezco a Dios por la vida que me regala y por encaminarme en este sueño. A mi compañera de tesis por su comprensión, compañerismo y la amistad que me ha brindado en cada logro y dificultad que hemos tenido. A los maestros que nos han compartido sus conocimientos durante todo el trayecto de este trabajo. A los amigos que hasta con el más pequeño acto han sido parte en el cumplimiento de esta meta. A José porque hizo mejor este camino.

Janeth Alexandra Yumbillo Morocho

TABLA DE CONTENIDO

RESUMEN.....	xviii
ABSTRACT.....	xix
INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO I	
1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL.....	6
1.1 Sistema de enfriamiento.....	6
1.2 Lógica difusa.....	7
1.2.1 Definición.....	7
1.2.2 Elementos de la lógica difusa.....	7
1.2.2.1 Variable lingüística.....	7
1.2.2.2 Universo de discurso.....	7
1.2.2.3 Término lingüístico.....	7
1.2.2.4 Función de membresía.....	7
1.3 Controlador difuso.....	8
1.3.1 Definición.....	8
1.3.2 Partes del controlador difusos.....	8
1.3.2.1 Interfaz de fusificación.....	8
1.3.2.2 Base de conocimientos.....	9
1.3.2.3 Lógica de decisiones.....	9
1.3.2.4 Interfaz de defusificación.....	10
1.3.3 Operadores lógicos.....	10
1.3.4 Reglas de lógica difusa.....	10
1.3.5 Inferencia difusa.....	11
1.3.5.1 Inferencia de Mamdani.....	11
1.3.5.2 Inferencia Takagi-Sugeno-Kang (TSK).....	13
1.3.6 Función de membresía.....	13
1.3.6.1 Función triangular.....	14
1.3.6.2 Función trapezoidal.....	14
1.3.6.3 Método del centroide.....	15
1.4 Controladores convencionales.....	16
1.4.1 Controladores PI (proporcional-integral).....	16
1.4.2 Controladores PD (proporcional-derivativo).....	17

1.4.3	<i>Controladores PID (proporcional-integral-derivativo)</i>	18
1.4.4	<i>Controlador de encendido y apagado (ON/OFF)</i>	19
1.4.5	<i>Limitaciones de un control PID</i>	19
1.5	Modulación por ancho de pulso (PWM)	20
1.6	Sensores	21
1.6.1	<i>Definición</i>	21
1.6.2	<i>Sensores de temperatura</i>	21
1.6.3	<i>Termopar o termocupla</i>	21
1.7	Láser	22
1.7.1	<i>Definición</i>	22
1.7.2	<i>Corte con láser</i>	23
1.7.3	<i>Tubo de láser de CO2</i>	23
1.7.4	<i>Rendimiento y aplicación</i>	24
1.7.5	<i>Ventajas</i>	24
1.8	Sistema de enfriamiento por agua	24
1.8.1	<i>Sistema de enfriamiento chiller</i>	25
1.8.2	<i>Sistema de enfriamiento con radiador</i>	25
1.9	Filtros	26
1.9.1	<i>Filtro de la media</i>	26
1.9.2	<i>Filtro Savitzky-Golay</i>	27
1.10	Ecuación de transferencia de calor	27
1.11	Características de la respuesta transitoria	28
1.12	Raíz del error cuadrático medio (RMSE)	28

CAPÍTULO II

2.	MARCO METODOLÓGICO	30
2.1	Requerimientos del sistema de enfriamiento	30
2.2	Construcción del sistema de enfriamiento	32
2.2.1	<i>Elementos del sistema de enfriamiento</i>	32
2.2.1.1	<i>Bomba de diafragma</i>	32
2.2.1.2	<i>Radiador</i>	33
2.2.1.3	<i>Ventilador</i>	33
2.2.1.4	<i>Depósito de agua</i>	34
2.2.1.5	<i>Fuente de alimentación</i>	35
2.2.2	<i>Implementación del sistema de enfriamiento</i>	35
2.3	Construcción del controlador de temperatura del sistema de enfriamiento	37

2.3.1	<i>Elementos del controlador del sistema</i>	37
2.3.1.1	<i>Módulo de sensores de temperatura</i>	37
2.3.1.2	<i>Sensor de flujo de agua</i>	38
2.3.1.3	<i>Microcontroladores</i>	39
2.3.1.4	<i>Pantalla de cristal líquido (LCD)</i>	40
2.3.1.5	<i>Fuente para el controlador</i>	41
2.3.1.6	<i>Buzzer</i>	42
2.3.1.7	<i>Gabinete para tablero de control</i>	42
2.4	Implementación de la tarjeta de control	43
2.5	Diseño de los controladores	44
2.5.1	<i>Modelo Matemático del sistema de enfriamiento</i>	44
2.5.1.1	<i>Ventilador</i>	44
2.5.1.2	<i>Radiador</i>	47
2.5.1.3	<i>Planta</i>	48
2.5.1.4	<i>Termocupla tipo K</i>	52
2.5.2	<i>Control clásico proporcional integral (PI)</i>	55
2.5.3	<i>Controlador basado en lógica difusa</i>	58
2.5.3.1	<i>Fusificación</i>	62
2.5.3.2	<i>Inferencia</i>	63
2.5.3.2.1	<i>Metodo de Mamdani</i>	63
2.5.3.2.2	<i>Metodo de Takagi-Sugeno- Kang (TSK)</i>	69
2.5.3.3	<i>Defusificación</i>	72
2.5.3.3.1	<i>Metodo de Mamdani</i>	72
2.5.3.3.2	<i>Metodo de Takagi-Sugeno- Kang (TSK)</i>	76
2.5.4	<i>Control PI con ganancias variables aplicando Takagi-Sugeno-Kang</i>	77
2.6	Experimentación	88

CAPÍTULO III

3	<i>MARCO DE RESULTADOS Y ANALISIS</i>	89
3.1	Estado transitorio	89
3.1.1	<i>Controlador clásico proporcional integral (PI)</i>	89
3.1.2	<i>Controlador difuso Mamdani</i>	91
3.1.3	<i>Controlador difuso Takagi-Sugeno- Kang (TSK)</i>	92
3.1.4	<i>Controlador clásico PI con ganancias variables Takagi-Sugeno- Kang (TSK)</i>	93
3.2	Estado estacionario	101

CONCLUSIONES	103
RECOMENDACIONES	105
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-2:	Requerimientos del sistema.....	31
Tabla 2-2:	Variación de velocidad del ventilador al variar el ciclo de trabajo del PWM.....	45
Tabla 3-2:	Constantes K y τ	55
Tabla 4-2:	Variables lingüísticas del error.....	60
Tabla 5-2:	Variables lingüísticas de la derivada del error.....	62
Tabla 6-2:	Subconjuntos activados del error.....	63
Tabla 7-2:	Subconjuntos activados de la derivada del error.....	64
Tabla 8-2:	Variables lingüísticas del subconjunto del PWM.....	65
Tabla 9-2:	Base de reglas definas para la inferencia Mamdani.....	67
Tabla 10-2:	Reglas activadas.....	68
Tabla 11-2:	Base de reglas definas para la inferencia TSK.....	71
Tabla 12-2:	Reglas de conocimiento.....	72
Tabla 13-2:	Variables lingüísticas del error.....	84
Tabla 14-2:	Base de reglas del conocimiento 1.....	84
Tabla 15-2:	Base de reglas del conocimiento 2.....	85
Tabla 16-2:	Base de reglas del conocimiento 3.....	86
Tabla 17-2:	Base de reglas del conocimiento 4.....	86
Tabla 18-2:	Base de reglas del conocimiento 5.....	87
Tabla 19-2:	Base de reglas del conocimiento 6.....	88
Tabla 1-3:	Valores de los parámetros característicos de respuesta del sistema.....	100
Tabla 2-3:	Mejoras bajo distintos parámetros.....	101
Tabla 3-3:	Comparación de controladores.....	101
Tabla 4-3:	Comparación de controladores.....	102
Tabla 5-3:	RMS de los controladores.....	103

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1-1:	Circuito cerrado de refrigeración	6
Figura 2-1:	Diagrama de bloques de un Sistema Controlador Difuso.....	8
Figura 3-1:	Base de conocimientos Particiones difusas con distinto número de términos: a) tres términos N, Z y P; b) siete términos NB, NM, NS, ZE, PS, PM y PB.....	9
Figura 4-1:	Sistema de Inferencia Difuso.....	12
Figura 5-1:	Función Triangular.....	14
Figura 6-1:	Función Trapezoidal.....	15
Figura 7-1:	Centro de área.....	16
Figura 8-1:	Diagrama de bloques del controlador PI.....	17
Figura 9-1:	Diagrama de bloques del controlador PD.....	18
Figura 10-1:	Diagrama de bloques del controlador PID.....	19
Figura 11-1:	Tiempo de estado On/Off	19
Figura 12-1:	Modulación por ancho de pulso.....	20
Figura 13-1:	Diferentes tipos de termocuplas.....	22
Figura 14-1:	Diagrama del Corte con láser	23
Figura 15-1:	Sistema de Enfriamiento Chiller.....	25
Figura 16-1:	Sistema de Enfriamiento con Radiador.....	26
Figura 17-1:	Transferencia de calor.....	27
Figura 1-2:	Etapas de diseño de los controladores.....	44
Figura 2-2:	Curva de respuesta de la velocidad del Ventilador frente a la variación....	46
Figura 3-2:	Parte lineal de la curva de Velocidad del Ventilador frente a la variación del ciclo de trabajo del PWM.....	46
Figura 4-2:	Temperatura de entrada y salida del agua en el radiador del sistema de enfriamiento.....	47
Figura 5-2:	Curva de respuesta filtrada y sin filtra.....	49
Figura 6-2:	Identificación de la constante de tiempo τ	50
Figura 7-2:	Respuesta real y simulada del sistema bajo el modelo calculado.....	50
Figura 8-2:	Constantes obtenidas con el PID Tuner de Matlab.....	51
Figura 9-2:	Respuesta real y simulada del sistema bajo el modelo de Matlab.....	51
Figura 10-2:	Curvas de respuesta de la termocupla tipo K frente a entradas tipo escalón.....	53
Figura 11-2:	Respuesta media simulada y real.....	55

Figura 12-2:	Diagrama de bloques del Sistema de Enfriamiento con un controlador PI.....	56
Figura 13-2:	Simulación del controlador clásico PI.....	57
Figura 14-2:	Respuesta simulada del controlador clásico PI.....	57
Figura 15-2:	Diagrama de bloques del Sistema de Enfriamiento con un controlador difuso.....	59
Figura 16-2:	Universo del discurso del Error.....	60
Figura 17-2:	Universo del discurso de la Derivada del Error.....	61
Figura 18-2:	Universo del discurso del PWM	64
Figura 19-2:	Grado de pertenencia regla 5.....	67
Figura 20-2:	Grado de pertenencia regla 6.....	68
Figura 21-2:	Grado de pertenencia regla 8.....	68
Figura 22-2:	Grado de pertenencia regla 9.....	69
Figura 23-2:	Agregación de los consecuentes.....	69
Figura 24-2:	División por áreas del consecuente agregado.....	72
Figura 25-2:	Establecimiento de puntos en el consecuente agregado.....	73
Figura 26-2:	Diagrama de bloques del sistema con el controlador PI.....	77
Figura 27-2:	Diagrama de bloques del sistema estableciendo como respuesta la salida del controlador.....	80
Figura 28-2:	Diagrama de bloques del Sistema de Enfriamiento con un controlador PI con ganancias variables aplicando TSK.....	82
Figura 29-2:	Función de pertenencia del error.....	82
Figura 1-3:	Curva de respuesta de la temperatura con un controlador PI clásico.....	90
Figura 2-3:	Curva de respuesta del controlador PI clásico.....	90
Figura 3-3:	Curva de respuesta de la temperatura con un controlador de Mamdani.....	91
Figura 4-3:	Curva de respuesta del controlador Mamdani.....	91
Figura 5-3:	Curva de respuesta de la temperatura con un controlador TSK.....	92
Figura 6-3:	Curva de respuesta del controlador TSK.....	92
Figura 7-3:	Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 1.....	93
Figura 8-3:	Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 1.....	94
Figura 9-3:	Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 2.....	94
Figura 10-3:	Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 2.....	95
Figura 11-3:	Curva de respuesta del controlador utilizando la base del	

	conocimiento 3.....	95
Figura 12-3:	Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 3....	96
Figura 13-3:	Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 4.....	96
Figura 14-3:	Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento4.....	97
Figura 15-3:	Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 5.....	97
Figura 16-3:	Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 5....	98
Figura 17-3:	Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 6.....	98
Figura 18-3:	Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 6.....	99

ÍDICE DE FOTOGRAFÍAS

Fotografía 1-2:	Tubo láser de CO2.....	31
Fotografía 2-2:	Bomba de agua.	32
Fotografía 3-2:	Radiador.....	33
Fotografía 4-2:	Ventilador.....	33
Fotografía 5-2:	Depósito de agua en SolidWorks.....	34
Fotografía 6-2:	Fuente de alimentación.....	35
Fotografía 7-2:	Diseño de la estructura de la planta en SolidWorks.....	36
Fotografía 8-2:	Montaje del radiador y ventilador en la estructura.....	36
Fotografía 9-2:	Montaje de la bomba de diafragma y la fuente.....	36
Fotografía 10-2:	a) Modulo de sensor de temperatura b) Termopar tipo K.....	37
Fotografía 11-2:	Sensor de flujo.....	38
Fotografía 12-2:	Microcontrolador.....	39
Fotografía 13 2:	Arduino Due.....	39
Fotografía 14-2:	LCD.....	40
Fotografía 15-2:	Fuente para el controlador.....	41
Fotografía 16-2:	Buzzer.....	42
Fotografía 17-2:	Gabinete.....	42
Fotografía 18-2:	Implementación de la PCB.....	43

ÍDICE DE ANEXOS

- Anexo A:** Toma de datos para el análisis del sistema.
- Anexo B:** Desarrollo de la estructura del sistema difuso.
- Anexo C:** Comprobación de los elementos utilizados.
- Anexo D:** Realización de la placa de control.
- Anexo E:** Montaje del sistema.

ÍNDICE DE ABREVIATURAS

CNC:	Control Numérico Computarizado
PI:	Proporcional, Integral
PD:	Proporcional, Derivativo
PID:	Proporcional, Integral, Derivativo
TSK:	Takagi-Sugeno-Kang
PWM:	Modulación por ancho de pulso
dE:	Derivada del Error
E:	Error
PCB:	Placa de Circuito Impreso
°C:	Grados Centígrados
RPM:	Revoluciones por Minuto
l:	Litro
BR:	Bases de reglas
CO₂:	Dióxido de Carbono

RESUMEN

Este trabajo trata de la construcción de un sistema de enfriamiento por agua para un tubo láser de Dióxido de Carbono (CO₂) de 100W con control difuso. Inicialmente se realizó un análisis para identificar los elementos físicos a componer el sistema. Una vez implementado se empleó un método experimental y procesamiento de datos con Matlab para obtener el modelo matemático que lo represente. En base al modelo obtenido se desarrolló un controlador de temperatura clásico Proporcional e Integral (PI) para mantener el refrigerante del sistema dentro de las condiciones óptimas de funcionamiento. Posteriormente se diseñó dos controladores aplicando lógica difusa para los cuales se estableció como entradas el error y a la derivada del error y como salida el porcentaje del ciclo de trabajo de una señal con Modulación por Ancho de Pulso (PWM). Para ambos controladores se siguió el mismo proceso de fusificación mientras para la etapa de inferencia y defusificación se aplicó el método Mamdani y Takagi-Sugeno-Kang (TSK) para su comparación. Se desarrolló un tercer controlador aplicando lógica difusa con el método de inferencia TSK al controlador clásico PI en la variación de las ganancias proporcional e integral. Se realizó la implementación de los controladores desarrollados y se analizó el comportamiento del sistema de enfriamiento con cada uno tanto en tiempo transitorio como estacionario. Del análisis se determinó un mejor comportamiento con los controladores basados en lógica difusa frente al controlador clásico. Puesto que al aplicar los métodos de inferencia Mamdani y TSK no se observó sobrepaso y se obtuvo un menor tiempo de establecimiento de la temperatura. Mientras con el controlador clásico PI con ganancias variables aplicando TSK se obtuvo respuestas mejoradas dependiendo de la base de reglas empleadas.

Palabras Claves: <CONTROL DE TEMPERATURA> < PROPORCIONAL E INTEGRAL >
<LÓGICA DIFUSA> <TAKAGI-SUGENO-KANG> <MAMDANI> <GANACIAS
VARIABLES>

SUMMARY

The following investigation is about the construction of a water-cooling system for a carbon dioxide (CO₂) laser tube of 100 W with a fuzzy control. First, an analysis was done to identify the physical elements to be part of the system. Once the system was implemented, an experimental method and data processing with Matlab were used to obtain the mathematical model that represents it. Based on the model obtained, a proportional- integral- derivative controller (PID) to maintain the refrigerant of the system in the ideal operational conditions was developed. After that, two controllers were designed using the fuzzy logic. For these controllers, the error and the derivative of error were used as the input, and as an output the percentage of the work cycle in a signal with Pulse Width Modulation (PWM) was used. For both controllers the same fuzzification process was followed. On the other hand, for the inference and defuzzification stage the method Mamdani and Takagi- Sugeno- Kang (TSK) were applied to compare them. The third controller was developed using the fuzzy logic with the inference method TSK to the proportional- integral- derivative controller in the variation of the variable gains proportional and integral. The controllers developed were applied and the cooling system performance was analyzed with every controller in transitory and stationary time. After the assessment, it was determined that performance with the controllers based on the fuzzy logic is better than the performance with the derivative controllers. We came to this conclusion because when the Mamdani and TSK inference methods were applied, no alterations over the limit were observed and the settling temperature time was inferior. On the other hand, with the derivative controllers with variable gains applying the TSK method, the results obtained were better depending on the base of the rules used.

KEY WORDS: <TEMPERATURE CONTROL> <PROPORTIONAL-INTEGRAL (PI)>, <FUZZY LOGIC>, < TAKAGI- SUGENO- KANG (TSK)>, < MAMDANI >, < VARIABLE GAINS >

INTRODUCCIÓN

El tubo láser de CO₂ de una máquina CNC es el elemento que se utiliza como herramienta para el corte y grabado de materiales. Uno de los parámetros importantes a controlar en el funcionamiento de la máquina láser es la temperatura del refrigerante que recorre el tubo de CO₂. Esta temperatura tiende a sufrir variaciones hasta llegar a altos niveles donde se produce un sobrecalentamiento del líquido comprometiendo así el trabajo del láser. La vida útil del tubo láser en estas máquinas de corte es influenciada por las altas temperaturas que aceleran el desgaste de este componente. Un sistema de enfriamiento ineficiente y de baja fiabilidad puede afectar de manera directa el estado de la máquina. Las consideraciones que se deben tener en cuenta indican que el sistema de enfriamiento debe garantizar que la temperatura del líquido refrigerante este por debajo de los 35 °C, variando de acuerdo a las especificaciones del fabricante (Embroider & Cam Corp 2012).

Actualmente para el uso de máquinas CNC láser se añade un equipo que se encuentra en el mercado ecuatoriano conocido como Chiller que cumple con el trabajo de enfriamiento del láser. Sin embargo su costo puede resultar elevado dependiendo de la potencia del tubo de CO₂ empleado. Algunos de los componentes internos que conforman un Chiller son: termostato, compresor, gas refrigerante, bomba, tanque, ventilador y condensador. El sistema responde activando o desactivando los actuadores de enfriamiento, en función de la temperatura de consigna ingresada. Una vez alcanzada la temperatura establecida, este control puede generar oscilaciones cambiando continuamente la acción de enfriamiento entre un estado activo e inactivo, variando la temperatura del refrigerante y consecuentemente del tubo láser. Por lo tanto es conveniente considerar otras técnicas de control, que permitan estabilizar el nivel de temperatura adecuado para el trabajo del láser en el proceso de corte.

Dentro de la Inteligencia Artificial o simplemente llamado Control Inteligente, se destaca la Lógica Fuzzy o Difusa la cual se ha convertido en un algoritmo ampliamente empleado. Esta metodología es una herramienta moderna y una de sus aplicaciones más importantes es el Control de Procesos Industriales. Se sale del tradicional esquema de control de lazo realimentado y del rígido modo de pensar de los programas de una microcomputadora para comenzar a emplear variables lingüísticas muchas veces consideradas imprecisas. Aun cuando parece ser sinónimo de imprecisión, la Lógica Difusa está basada en una disciplina fuertemente rigurosa que permite describir exactamente un Sistema de Control sin utilizar complicadas expresiones matemáticas (Hernández 2015).

Espitia y Soriano docentes de la Universidad Distrital Francisco José de Caldas en Colombia. Realizaron el diseño y simulación de un control difuso de temperatura para una bañera, basado en relaciones booleanas. Como primera parte presentan el diseño del controlador booleano y posteriormente el controlador difuso partiendo desde el booleano. Se aplica la simplificación de reglas de inferencia por algebra de Boole. Afirmando que el método puede ser utilizado en sistemas de lógica difusa tipo Mamdani. La investigación concluyó en un mejoramiento del sistema dinámico del sistema, a través de conjuntos booleanos adyacentes (Espitia & Soriano 2011).

Valdivia estudiante de la Universidad Ricardo Palma, en Perú. Realiza el proyecto de investigación para el control de temperatura de una habitación mediante lógica difusa aplicando el método de inferencia de Mamdani. Se recalca la importancia de conocimiento experto para establecer las reglas de inferencia que dará al sistema la capacidad de toma de decisiones. El desarrollo del trabajo se llevó a cabo por medio del Toolbox Fuzzy Logic de Matlab. La investigación concluye, en un sistema estable, utilizando el Toolbox Ident de Matlab. Sin embargo menciona la importancia de probar el sistema en un ambiente real para confirmar, la adecuada definición de reglas sobre las que se ha basado el sistema difuso (Valdivia 2014).

En un artículo publicado por García, Torres, Pinto, González, Rengel y Pérez se da a conocer los resultados de la aplicación de un control con lógica difusa aplicando el método de inferencia de Mamdani y TSK para el proceso de ultra congelación de alimentos. Del trabajo ejecutado se concluye que en las pruebas realizadas los valores de las variables de salida no presentan mayores oscilaciones respecto a la referencia frente a perturbaciones. Sin embargo el controlador tipo Mamdani no produjo los resultados requeridos haciendo necesario el rediseño del controlador. Mientras la respuesta del controlador con TSK proporcionó una desviación menor a los requerimientos optándose por su selección (García et al, 2017).

Ushiña y Villagomez estudiantes de la Universidad Politécnica Nacional en el Ecuador. Realizaron como proyecto de titulación, en la facultad de Ingeniería Eléctrica y Electrónica, el control de temperatura mediante lógica difusa para el Terrario del Museo Nacional del Instituto de Ciencias Biológicas. Se diseñó tres diferentes técnicas de control: ON/OFF, PI y FUZZY. Se realizó el contraste entre las mismas, prestando mayor atención al control difuso, tipo Mamdani, por ser la técnica que en los últimos años ha venido ganado espacio en el control automático. En base a las pruebas realizadas, en el trabajo investigativo, se concluye que el controlador FUZZY tiene una capacidad de respuesta mucho más eficiente en comparación con el control PI y control ON/OFF. Se afirma que el controlador FUZZY tiene un error relativo menor frente a un incremento de consigna. Se explica que esto se debe a la rapidez de toma de decisiones en el sistema difuso, a diferencia del tiempo que un control PI requiere para el cálculo computacional. Realizado un análisis energético se demostró un menor consumo de energía en el control FUZZY

y PI, puesto que el consumo en el control ON/OFF es del 100% en estado activo y por lo tanto la potencia absorbida es la nominal (Ushiña & Villagomez ,2016).

A través de la investigación de varios trabajos de implementación de sistemas de control de temperatura aplicando lógica difusa. Se evidencia resultados en donde esta técnica supera a la respuesta de controladores clásicos. También se ha identificado los métodos de inferencia de Mamdani y Takagi-Sugeno-Kang como los más empleados en este tipo de control. En base a ello se propone el desarrollo de controladores de temperatura con lógica difusa. Para el sistema de enfriamiento del láser de CO₂ de una máquina cortadora CNC. Utilizando los métodos de Mamdani y TSK para su posterior comparación.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

¿La construcción de un controlador de temperatura por lógica difusa, para el sistema de enfriamiento del láser de una máquina cortadora CNC, disminuirá las variaciones de temperatura del líquido refrigerante respecto a un sistema de control clásico?.

SISTEMATIZACIÓN DEL PROBLEMA

- ¿Qué modelos de controladores de lógica difusa son los más aplicados para el control de temperatura?.
- ¿Cómo se obtendrá el modelo dinámico de la planta que describa su comportamiento y que pueda ser utilizado para el diseño del controlador?.
- ¿Cuál será la metodología que debe ser ejecutada para el diseño de un controlador difuso para el control de temperatura?.
- ¿Cuál será la implementación más apropiada del controlador lógico difuso para el enfriamiento del láser de una máquina cortadora CNC?.
- ¿Cómo se puede evaluar el desempeño relativo del controlador lógico difuso implementado?.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

- Construir un controlador de temperatura basado en lógica difusa aplicado al Sistema de Enfriamiento del Láser de una Máquina de Corte CNC

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Investigar sobre modelos de controladores de lógica difusa más aplicados en el control de temperatura, a través de fuentes de información primarias y secundarias.

- Obtener el modelo dinámico de la planta que describa su comportamiento, para el diseño del controlador
- Diseñar el controlador difuso, para el control de temperatura, utilizando la metodología identificada como adecuada para su aplicación.
- Implementar el controlador lógico difuso para el control de temperatura del líquido refrigerante del sistema de enfriamiento del láser de una máquina cortadora CNC.
- Evaluar el desempeño del controlador lógico difuso implementado frente a un control convencional, para establecer diferencias entre los mismos, analizando la estabilidad alcanzada.

DELIMITACIÓN

Espacio

La presente investigación se delimita a la ciudad de Riobamba, específicamente en la empresa “Dexter’s Electronics” de propiedad del Ing. Hugo Bravo, cuenta con laboratorios de investigación y diseño de prototipos electrónicos, donde se utilizara la maquina CNC con su sistema de enfriamiento difuso para el corte de piezas y grabado, se prevé implementar el dispositivo en un espacio de 70 cm de largo, 28 cm de ancho y 100 cm de altura.

Tiempo

Se emplean 3 días para la toma de datos de las respuestas del sistema de enfriamiento con cada uno de los controladores desarrollados. La experimentación se realiza en un ambiente libre de otro equipo de generación de calor. El horario de pruebas está dentro de las 10:00 am a 13:00 pm cada día.

Alcance

Con la implementación del sistema de temperatura basado en lógica difusa aplicado al sistema de enfriamiento del láser de una máquina de corte CNC, se espera tener un control eficiente en el enfriamiento del tubo láser de CO₂, mediante la programación de un sistema difuso se podrá controlar automáticamente la temperatura adecuada del sistema, la cual debe estar entere un rango de 15-25°C y de esta manera podremos precautelar la vida útil de la máquina.

El presente documento consta de una metodología analítica que posee investigación teórica a través de un estudio bibliográfico, diseño mecánico de la estructura de sistema, análisis de funcionamiento y presentación de resultados de la implementación del sistema difuso. Se detalla

en tres capítulos el desarrollo de la investigación planteada, el primer capítulo estudia lo relacionado a la lógica difusa, tipos de inferencia difusas, tipos de controladores clásicos, sistemas de enfriamiento por agua. El capítulo dos contiene las fases de desarrollo, se realiza toma de datos de los elementos a utilizar, se define los requerimientos, se selecciona el hardware y software y finalmente se diseña la estructura mecánica para el sistema. En el capítulo tres se realiza pruebas de la eficiencia del sistema con los controladores programados y se analiza mediante base de reglas, cuál de ellos cumple con los requerimientos establecidos para el funcionamiento óptimo en el equipo.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1 Sistema de enfriamiento

Los sistemas de refrigeración se basan en principios termodinámicos y están diseñados para promover el intercambio de calor entre los elementos mecánicos del proceso térmico y el líquido refrigerante para facilitar la liberación del calor. Existe varios tipos de refrigeración y se pueden clasificar en función de su diseño y de su principio básico de funcionamiento: agua o aire, o una combinación de ambos, pero el más utilizado en los últimos años en la industria es el sistema de refrigeración por agua (Colegio de Ingenieros España, 2016).

La refrigeración por agua se ha considerado como una de las más eficaces en cuanto a la regulación de temperatura. Este tipo de refrigeración tiene la habilidad de mantener baja la temperatura del líquido refrigerante y trabaja por medio de una red de conductos. Cuando la temperatura sube, el líquido enviado al radiador (un tanque de aluminio que actúa como disipador de calor) para que sea enfriado por un flujo de aire que es generado por un ventilador eléctrico. Al final, el líquido enfriado es enviado de regreso a su depósito como se aprecia en la Figura 1-1 (Redacción, 2017).

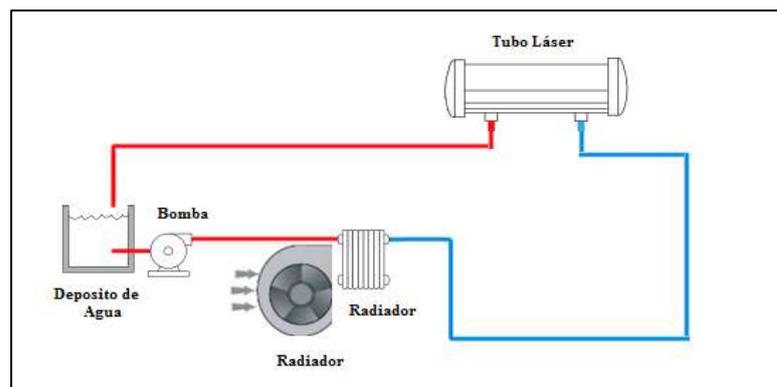


Figura 1-1: Circuito cerrado de refrigeración.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

En la actualidad, los sistemas de enfriamiento por agua están siendo ocupados en la industria, por su gran capacidad de enfriamiento y por su costo reducido en cuanto al mantenimiento y a su operatividad (Redacción, 2017).

1.2 Lógica difusa

1.2.1 Definición

La lógica difusa utiliza expresiones que no son ni totalmente falsas ni totalmente verdaderas, es decir, es la lógica aplicada a conceptos que en algún momento son cambiantes y oscilan entre un rango de valores predeterminados comenzando desde un valor mínimo hasta llegar a un valor máximo, tomando también sus valores intermedios (Murillo & Guzmán 2014, p. 54-55).

1.2.2 Elementos de la lógica difusa

1.2.2.1 Variable lingüística

Son variables evaluadas en un lenguaje natural y no corresponden a un valor numérico exacto. Por ejemplo. Temperatura, velocidad, etc (Aldaz & Infante 2017, p. 12).

1.2.2.2 Universo de discurso

Rango de información necesaria para el comportamiento correcto de un sistema y que está relacionado con una variable lingüística. Por ejemplo, temperatura de 15 a 100 °C, velocidad de 10 a 20 m/s, etc (Aldaz & Infante 2017, p. 12).

1.2.2.3 Término lingüístico

Son los sub-conjuntos o las partes que puede dividirse una variable lingüística o en que desee dividirse. Por ejemplo, para la variable temperatura se puede tener los términos muy alto, alto, medio, bajo; etc (Aldaz & Infante 2017, p. 13).

1.2.2.4 Función de membresía

Es la agrupación de conjuntos difusos correspondientes a una sola variable lingüística, asociada a su grado de pertenencia o membresía dentro del intervalo 0-1 (Aldaz & Infante 2017, p. 13).

1.3 Controlador difuso

1.3.1 Definición

Un controlador basado en lógica difusa es un sistema electrónico e informático que sirve de soporte físico para realizar inferencias con lógica difusa programadas. Este dispositivo funcionará en los niveles inferiores de la pirámide de control, cerrando lazos de control en forma similar a un control convencional. Se aplica con sencillez a procesos complejos y pobremente definidos ya sea porque no se dispone de conocimiento cuantitativo o por la información imperfecta proveniente de los sensores. Los algoritmos utilizan instrucciones IF, THEN (Tavera 2005, p. 5).

1.3.2 Partes del controlador difuso

De acuerdo a Ponce Cruz (2010, pp. 72-73), un controlador difuso está compuesto de cuatro partes principales como: Interfaz de fusificación, Base de conocimientos, Lógica de decisiones, Interfaz de desfusificación tal y como se muestra en la Figura 2-1.

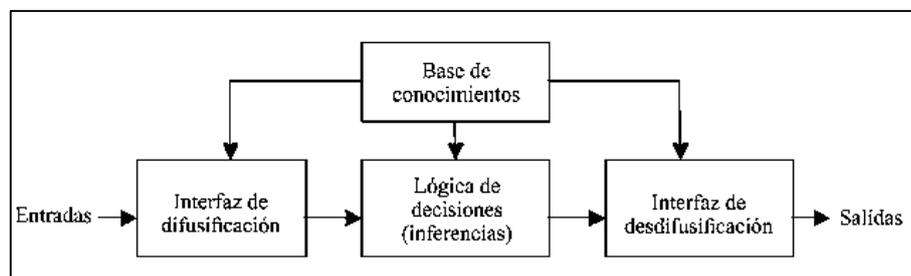


Figura 2-1: Diagrama de bloques de un Sistema Controlador Difuso.

Fuente: (Ponce 2010).

1.3.2.1 Interfaz de fusificación

Mide los valores de las variables de entrada para realizar un mapeo a escala que transfiere el rango de valores de las variables a un universo de discurso difuso. La fusificación convierte los datos de entrada en valores lingüísticos que son las etiquetas de las funciones de pertenencia o conjuntos difusos (Ponce Cruz 2010, pp. 72-73).

Una variable lingüística se asocia a un conjunto de términos definidos en el mismo universo. Para encontrar cuántos términos son necesarios en un conjunto se emplean particiones difusas. El número de conjuntos difusos determina la complejidad del controlador, y éstos tienen

un significado lingüístico como “negativo grande”, “cero”, “positivo pequeño”. Se muestra ejemplos de dos particiones difusas en el mismo universo, normalizado de -1 a +1 en la Figura 3-1 (Ponce Cruz 2010, pp. 72-73).

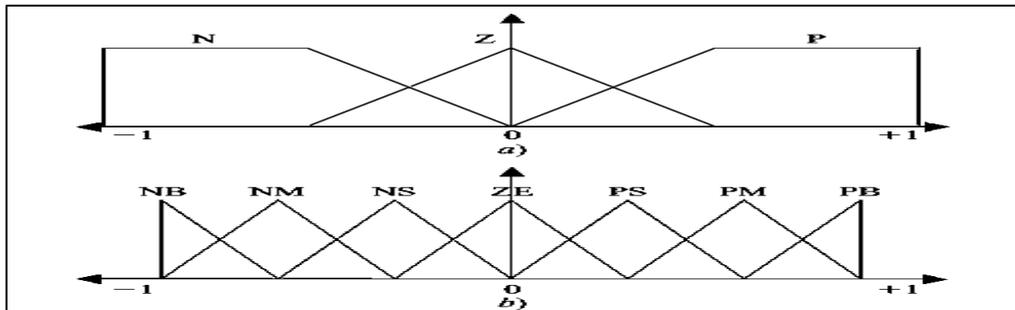


Figura 3-1: Base de conocimientos particiones difusas con distinto número de términos: a) tres términos N, Z y P; b) siete términos NB, NM, NS, ZE, PS, PM y PB.

Fuente: (Ponce, 2010).

1.3.2.2 Base de conocimientos

La base de conocimientos contiene toda la información de la aplicación que se va a controlar, así como las metas del controlador. Consta de una base de datos y una base de reglas lingüísticas para controlar la variable. La base de datos proporciona las definiciones para el establecimiento de reglas y la manipulación de datos difusos. La base de reglas caracteriza las metas de control y la política que utilizan los expertos para llevar a cabo el control, empleando proposiciones (Ponce Cruz 2010, pp. 72-73).

Un algoritmo de control difuso debe ser capaz de inferir una acción de control correspondiente para cada estado del proceso que se va a controlar, propiedad que se denomina unidad. La estrategia de la base de datos comprende los soportes de la definición de los conjuntos difusos (Ponce 2010, p. 73).

1.3.2.3 Lógica de decisiones

La lógica utilizada para tomar decisiones dentro de un controlador difuso es el núcleo mismo. A partir de la misma se simula la lógica que utilizan las personas para tomar decisiones, con base en conceptos difusos y en la inferencia de acciones de control, empleando implicaciones y las reglas establecidas según la base de conocimientos (Ponce Cruz 2010, pp. 72-73).

1.3.2.4 Interfaz de desfusicación

La interfaz de desfusicación se encarga del mapeo a escala que convierte el rango de valores de las variables de salida a sus universos de discurso correspondientes. La desfusicación es la herramienta para obtener la acción de control nítida a partir de una acción de control difusa (Ponce 2010, p. 74).

1.3.3 Operadores lógicos

De acuerdo a Ponce Cruz (1999, pp. 4-6), Existen tres operaciones básicas entre conjuntos concretos y son:

- Unión
- Intersección
- Complemento

Se de finen también para los conjuntos difusos, intentando mantener el significado de tales operaciones (Duarte 1999, p. 4).

Unión: También conocido como OR, efectuando la operación de Unión entre dos conjuntos difusos A y B definidos sobre el mismo Universo, y con funciones de pertenencia $u_A(x)$ y $u_B(x)$ respectivamente es un nuevo conjunto difuso $A \cup B$ definido sobre el mismo universo (Duarte 1999, pp. 4-6).

Intersección: También conocido como AND, efectuando la operación de Intersección entre dos conjuntos difusos A y B definidos sobre el mismo Universo, y con funciones de pertenencia $u_A(x)$ y $u_B(x)$ respectivamente es un nuevo conjunto difuso $A \cap B$ definido sobre el mismo universo (Duarte 1999, pp. 4-6).

Complemento: También conocido como NOT, efectuando la operación de Complemento sobre un conjunto difuso A definido sobre un Universo, y con función de pertenencia $u_A(x)$ es un nuevo conjunto difuso A' definido sobre el mismo universo (Duarte 1999, pp. 4-6).

1.3.4 Reglas de lógica difusa

Analizando los controladores con lógica difusa parte de cierto tipo de razonamiento que permite obtener resultados lógicos útiles. La lógica difusa se basa en un conjunto de reglas lingüistas llamados premisas o condiciones, que son combinación de operadores AND, OR, o NOT, para inferir un resultado (Martínez 2010, p. 37).

Una de las reglas lingüísticas se inicia con un *if*, o sea un “*si*”, y la condición a revisar puede constar de operadores. Se inicia si la condición *if* se cumple; en este caso se activa la regla. Cuando esto sucede, se procede a calcular una salida que depende de la parte *then* o “*entonces*”. Luego de realizar este proceso se puede tener resultados o “*conclusiones*” de la regla, que consta de una serie de predicadores unidos por operadores AND u OR. Al igual que las reglas, la conclusión tiene grados de activación (Martínez 2010, p. 37).

La cantidad de reglas será determina por el número de términos lingüísticos elevado a las variables de entrada del sistema, multiplicado por el número de salidas, por ejemplo, la planta cuenta con cuatro términos lingüísticos, dos entradas y dos salida da como resultado un total de 32 reglas lingüísticas como se observa en la ecuación (Aldaz & Infante 2017, p. 17).

$$4 \text{ Términos Lingüísticos } ^ 2 \text{ entradas } * 2 \text{ salida}$$

1.3.5 Inferencia difusa

La inferencia difusa puede definirse como el proceso de obtener un valor de salida para un valor de entrada empleando la teoría de conjuntos difusos. A continuación veremos dos tipos de inferencia: el modelo de Mamdani y el de TSK (Takagi, Sugeno y Kang) (González 2015, p. 23).

1.3.5.1 Inferencia de Mamdani

De acuerdo a González (2015, p. 23), es posiblemente el método más ampliamente utilizado, propuesto por Ebrahim Mamdani en 1975, como se aprecia en la Figura 4-1. El proceso se realiza en cuatro pasos:

1. Fuzificación de las variables de entrada.
2. Evaluación de las reglas.
3. Agregación de las salidas de las reglas.
4. Defuzificación.

Paso 1: Fuzificación de los valores de entrada al sistema. Ello se efectúa en caso de que los valores que se ingresan a él sean de tipo concreto; estos valores son introducidos al subsistema fusificador (Bedoya 2014, p. 37-38).

Paso 2: Evaluar el antecedente de cada regla borrosa, si las reglas difusas están relacionadas por una conjunción (*and*), se utilizara un operador *T – norma*, o el operador *T – conorma* si las reglas difusas están relacionadas por una disyunción (*or*) (Bedoya 2014, p. 37-38).

Paso 3: Obtener la conclusión de cada regla a partir del consecuente y del valor del antecedente obtenido en el paso 2. Ello requiere aplicar un operador borroso de implicación, el cual se incorpora a través del subsistema motor de inferencia; la conclusión alcanzada de esta manera es un nuevo conjunto borroso (Bedoya 2014, p. 37-38).

Paso 4: Defuzificación la conclusión borrosa obtenida en el paso 4 con el fin de estimar un valor concreto de salida (Bedoya 2014, p. 37-38).

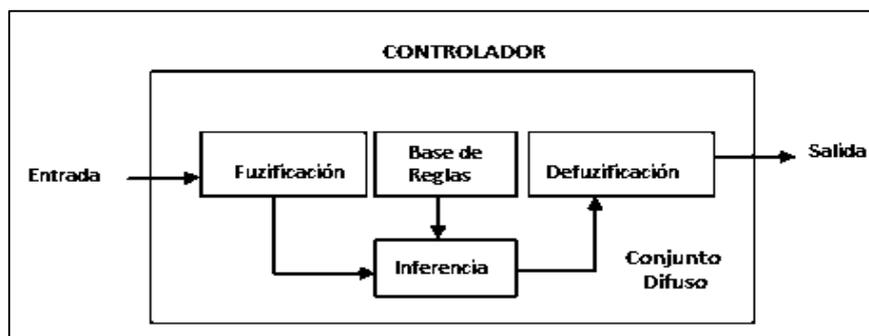


Figura 4-1: Sistema de inferencia difuso.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

De acuerdo a Murillo y Guzmán (2014, p. 16-17), se realiza un sistema de control de temperatura basado en lógica difusa con reglas de Inferencia de Mamdani, con el fin de generar soluciones alternativas, para el sistema de control "clásico" actual, con el propósito de comparar ambos métodos y establecer cuál de ellos brinda más beneficios tanto en el proceso de control, costo de diseño, costos de implementación y mantenimiento del equipo.

En los últimos años el modelado de sistemas de control no lineales ha requerido de soluciones muy complejas y rápidas en su respuesta; el control difuso está orientado al mejoramiento de las características del control "clásico" se ha convertido en un método muy útil para controlar este tipo de procesos, con dicho método se puede imitar el razonamiento de la mente humana para la resolución de problemas y toma de decisiones en el sistema (Murillo & Guzmán 2014, p. 12).

De acuerdo a Espino (2017, p. 101), realiza la tesis de control de temperatura con lógica difusa para un sistema de espectroscopia láser, toda su programación está enfocada a la lógica difusa con reglas de Inferencia de Mamdani, es una herramienta muy útil dentro de la ingeniería pues ayuda a resolver problemas de una forma sencilla; el sistema que construyo logra ser preciso y exacto, cuando opera con el microcontrolador Arduino Mega 2560.

El uso de nuevas formas de control, ayudan a solucionar problema en la vida real en los sistemas de control y se logró resolver el problema de una forma fácil y sencilla con un bajo costo gracias a la implementación de la lógica difusa que desempeña un trabajo de alta calidad (Espino 2017, p. 101).

1.3.5.2 Inferencia Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

De acuerdo a González (2015, p. 23), este método no es muy eficiente desde el punto de vista computacional. Podemos disminuir el tiempo de inferencia empleando una función matemática en el consecuente, de forma que el formato general de regla en inferencia TSK es:

$$p : \text{IF } x \text{ es } A \text{ And } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } f(x, y)$$

Este tipo de método proporciona mayor eficiencia, pero no presentan un marco tan natural para la representación del conocimiento humano. Un tipo habitual de representación del consecuente es un singleton (punta discreta), que toma valor uno en un valor puntual del universo del discurso y cero en cualquier otro punto. Empleando este tipo de aproximación (ampliamente utilizada), la inferencia TSK y de Mamdani son muy parecidas tomando las reglas el siguiente formato:

$$p : \text{IF } x \text{ es } A \text{ And } y \text{ es } B \text{ THEN } z \text{ es } k$$

Siendo k un valor constante para el singleton (González 2015, p. 23).

De acuerdo con los autores Zaragoza, Cuevas y Mendoza (2017, p. 396), en el artículo presentan la implementación del método difuso Takagi-Sugeno-Kang (TSK) para el control de temperatura en el aire acondicionado, con el objetivo de aumentar la eficiencia del sistema, mejorar el rendimiento y reducir el consumo de energía que este produce.

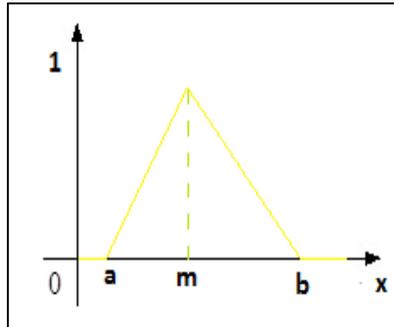
Los resultados obtenidos a través de la simulación y experimentación en este estudio del artículo demuestran que, al emplear el control difuso TSK en sistemas de aire acondicionado convencionales, se observó un desempeño del compresor muy eficiente y estable, lo que se traduce en ahorro de energía eléctrica favorable (Zaragoza, Cuevas y Mendoza 2017, p. 407).

1.3.6 Función de membresía

De acuerdo a Ponce Cruz (2010, p. 74), realiza la presentación de los grados de pertenencia de los elementos del conjunto difuso, existen varias funciones de membresía como, función triangular, función trapezoidal, método del centroide, que mediante figuras geométricas representan una función los términos lingüísticos entre ellos tenemos:

1.3.6.1 Función triangular

La función triangular es una de las más usadas al momento de delinear un controlador difuso. Esta consta de tres puntos importantes: sus extremos y su centro los que le darán su forma característica, no necesita ser simétrica. El que realiza el controlador es quien designará estos puntos de trabajo de acuerdo a las características de funcionamiento de la variable que requieran (Rodríguez & Daza 2016, p. 20-21).



$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } x \leq a \\ \frac{x-a}{m-a}, & \text{si } a < x \leq m \\ \frac{b-x}{b-m}, & \text{si } m < x < b \\ 0, & \text{si } x \geq b \end{cases}$$

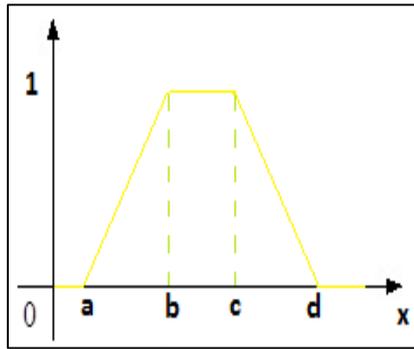
Figura 5-1: Función triangular.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se puede observar en la Figura 5-1, la función de membresía triangular donde **a** es el punto inicial de la función, **b** es el extremo final de la función y **m** es el punto central donde se alojará el vértice superior de la función. La variable **x** será cualquier valor entre **a** y **b** con el que se podrá determinar, con la ayuda de la definición expuesta, el valor de membresía para cada punto (Rodríguez & Daza 2016, p. 20-21).

1.3.6.2 Función trapezoidal

La función trapezoidal es un tipo de función de membresía cuya forma característica es un trapecoide. Sus puntos más importantes serán: sus extremos y los límites de su base superior como se muestra en la Figura 6-1 (Rodríguez y Daza 2016, p. 20-21).



$$\mu_A(x) = \begin{cases} 0, & \text{si } (x < a), \text{ ó } (x < d) \\ \frac{x-a}{b-a}, & \text{si } a \leq x \leq b \\ 1, & \text{si } b < x < c \\ \frac{d-x}{d-c}, & \text{si } c \leq x \leq d \end{cases}$$

Figura 6-1: Función trapezoidal.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

1.3.6.3 Método del centroide

De acuerdo con Infante y Aldaz (2015, p. 23), el método centro de área, transforma el conjunto difuso de salida, producto de la inferencia, en números reales que la planta puede procesar, se define por una ecuación 1:

$$z = \frac{(A_1 * d_1) + (A_2 * d_2) + \dots + (A_n * d_n)}{A_t} \quad (1)$$

Dónde:

z = Centro de Área

A_n = Áreas de los triángulos y Rectángulos

d_n = Centro de Gravedad de triángulos y Rectángulos tomando encuentra su distancia desde el origen.

Donde z equivale el centro de gravedad de un grupo de masas formado por cada función de membresía de los conjuntos difusos resultantes en la variable de salida, como se muestra en la Figura 7-1 (Aldaz & Infante 2017, p. 18-19).

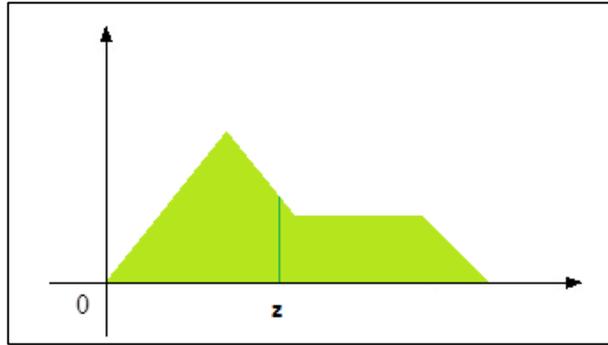


Figura 7-1: Centro de área.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Para obtener el centro de área, se hace uso de los siguientes pasos:

- Dividir al polígono irregular en triángulos y rectángulos.
- Encontrar el centro de área de los triángulos siendo estos $1/3$ de sus catetos.
- Encontrar el centro de área de los Rectángulos siendo estos es cruce de sus diagonales.
- Se obtiene el centro de gravedad haciendo uso de la fórmula anterior.(Aldaz & Infante 2017, p. 19).

1.4 Controladores convencionales

Los controladores PI, PD y PI convencionales, utilizando la técnica indirecta de control orientada al campo. El controlador convencional es un controlador de realimentación, calcula un valor de error como la diferencia entre el valor de proceso medido y el valor de consigna deseado y luego mueve la planta controlada para mantener el error de estado estable igual a cero (Villalba 2017, p. 24).

1.4.1 Controladores PI (proporcional-integral)

De acuerdo a Villalba (2017, p. 24), el controlador Proporcional-Integral, PI, es el más adoptado en aplicaciones industriales debido a su estructura simple, fácil de diseñar y bajo costo. El controlador PI produce una señal de salida consistente en una suma de error y la integral de ese error. La función de transferencia para el controlador PI se expresa como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Donde, K_p es la ganancia proporcional, K_i es la ganancia integral, y $U(s)$ es la señal de control de salida que representa Te la referencial en el proceso. Mientras que, la señal de control es proporcional a la señal de error, la integral del error, la ganancia proporcional K_p y la ganancia integral K_i . El controlador proporcional tendrá el efecto de reducir el tiempo de subida y el error de estado estacionario, como podemos apreciar en la Figura 8-1 (Villalba 2017, p. 24).

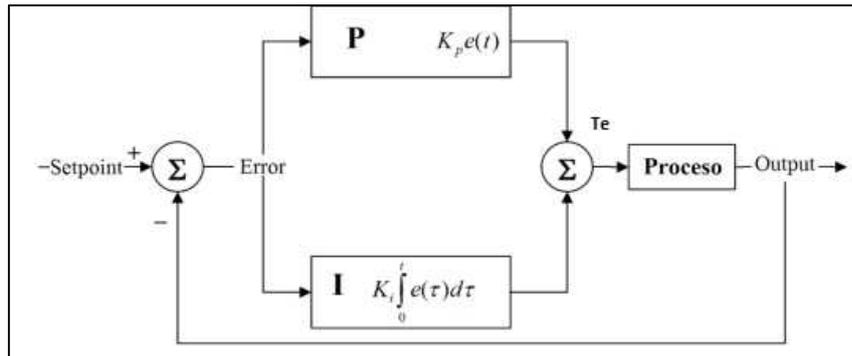


Figura 8-1: Diagrama de bloques del controlador PI.

Fuente: (Murillo y Guzmán 2014).

1.4.2 Controladores PD (proporcional-derivativo)

De acuerdo a Villalba (2017, p. 24), el controlador Proporcional-Derivativo, PD, es un controlador que tiene la capacidad de predecir el error futuro del sistema. Por lo tanto, se utiliza para aumentar la estabilidad del sistema. La salida del controlador PD consiste en una suma de dos términos, la señal de error y la derivada de ese error, cuya función de transferencia del controlador PD se expresa como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + K_d S$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_d es la ganancia derivativa, y S es la señal de control de salida que representa Te la referencia de par en la unidad de control vectorial, como podemos ver en la Figura 9-1 (Villalba 2017, p. 24).

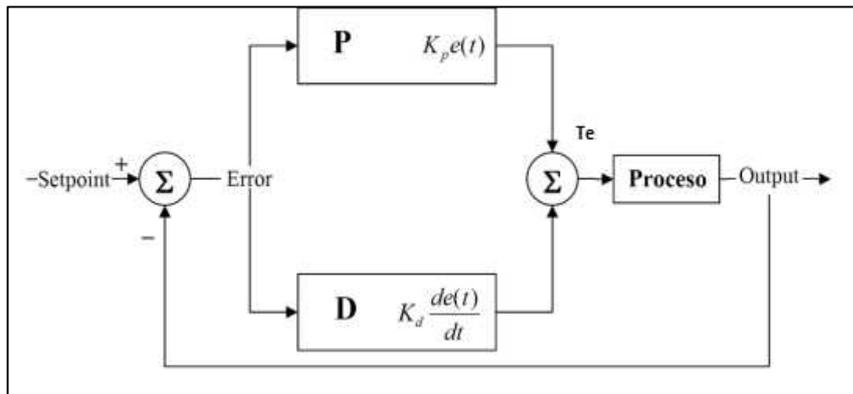


Figura 9-1: Diagrama de bloques del controlador PD.

Fuente: (Murillo y Guzmán ,2014).

1.4.3 Controladores PID (proporcional-integral derivativo)

De acuerdo a Villalba (2017, p. 24), es ampliamente utilizado en los sistemas de control industrial. El regulador PID tiene todas las dinámicas necesarias: reacción rápidamente al cambiar la entrada del controlador D, aumentando la señal de control al error de avance hacia cero (controlador I) y acciona adecuadamente dentro del área de error de control para eliminar oscilaciones (controlador P). El modo derivado mejora la estabilidad del sistema y permite aumentar la ganancia K_p , lo que aumenta la velocidad de la respuesta del controlador.

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s$$

Donde K_p es la ganancia proporcional, K_d es la ganancia derivada, K_i es la ganancia integral, y $U(s)$ es la señal de control de salida que representa la referencia de par Te en el proceso, como podemos apreciar en la Figura 10-1 (Villalba 2017, p. 24).

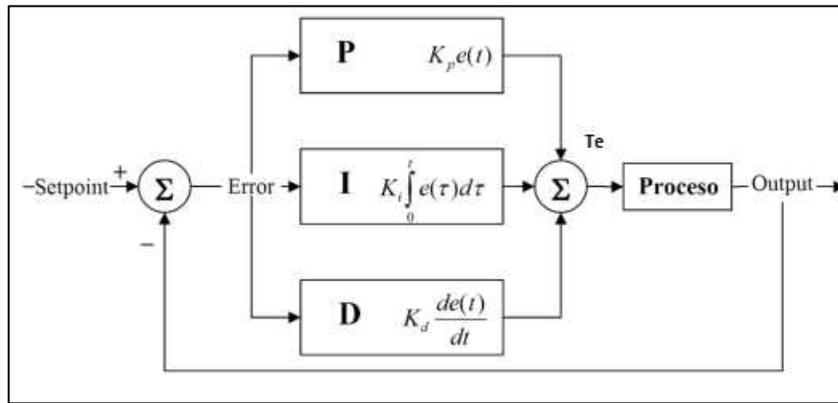


Figura 10-1: Diagrama de bloques del controlador PID.

Fuente: (Murillo y Guzmán 2014).

1.4.4 Controlador de encendido y apagado (on/off)

En un sistema de control de dos posiciones, el elemento de actuación sólo tiene dos posiciones fijas, que en muchos casos son simplemente encendido y apagado. El control de dos posiciones o de encendido y apagado es relativamente simple y económico, razón por la cual su uso es extendido en sistemas de control tanto industriales como domésticos, como podemos apreciar en la Figura 11-1 (Ogatha 2010, p. 23).

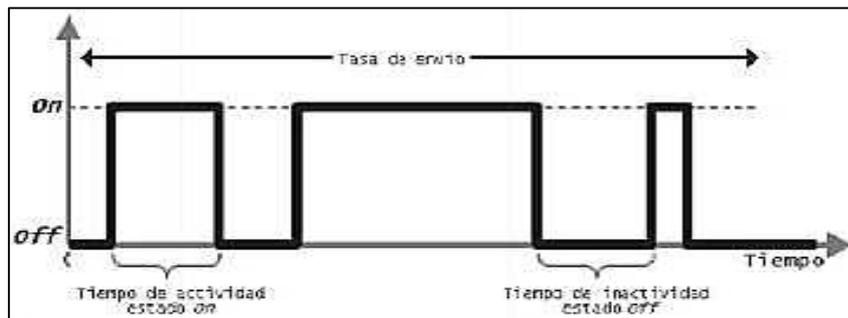


Figura 11-1: Tiempo de estado On/Off.

Fuente: http://www.scielo.org.co/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0123-921X2011000300013.

1.4.5 Limitaciones de un control PID

Los controladores PID son aplicables a la mayoría de los problemas de control, cuando se usan solos, pueden dar un desempeño pobre cuando la ganancia del lazo del PID debe ser reducida para que no se dispare u oscile sobre el valor del "set point". El desempeño del sistema de control puede ser mejorado combinando el lazo cerrado de un control PID con un lazo abierto (Murillo y Guzmán 2014, p. 43-44).

Conociendo el sistema puede ser combinado con la salida del PID para aumentar el desempeño final del sistema. El controlador PID puede ser usado principalmente para responder a cualquier diferencia o "error" que quede entre el "set point" y el valor actual del proceso (Murillo y Guzmán 2014, p. 43-44).

El lazo del PID usa la información de la realimentación para incrementar o decrementar la diferencia entre el "set point" y el valor del primero. Otro problema que posee el PID es que es lineal, principalmente el desempeño de los controladores PID en sistemas no lineales es variable. También otro problema común que posee el PID es, que en la parte derivativa, el ruido puede afectar al sistema, haciendo que esas pequeñas variaciones, hagan que el cambio a la salida sea muy grande (Murillo y Guzmán 2014, p. 43-44).

1.5 Modulación por ancho de pulso (PWM)

El PWM o Modulación por ancho de pulso es una técnica para modificar el ciclo de trabajo de una señal periódica con el fin de transmitir información o para controlar la cantidad de energía que se manda a una carga, como se puede apreciar en la Figura 12-1 (Espino 2017, p. 54).

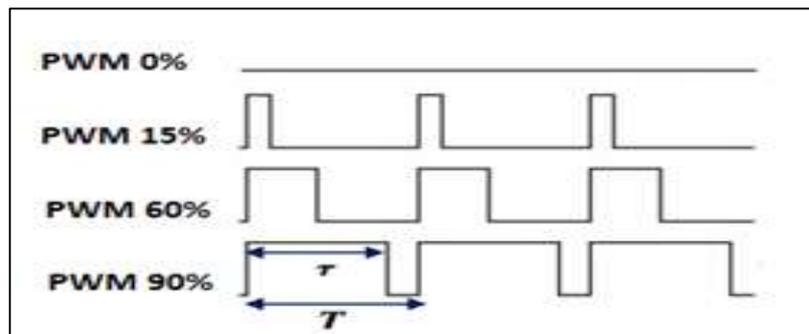


Figura 12-1: Modulación por ancho de pulso.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

De acuerdo a Espino (2017, p. 54) ,el ciclo de trabajo está dado por la expresión

$$D = \frac{\tau}{T}$$

Donde τ es la duración donde el pulso está en alto y T es el periodo del pulso.

1.6 Sensores

1.6.1 Definición

Un sensor es un dispositivo que detecta manifestaciones de cualidades o fenómenos físicos convirtiendo su magnitud en una señal eléctrica, este tipo de transductor facilita la medición de la variable física, puede ser de indicación directa o puede estar conectado a un indicador de modo que los valores sensados puedan ser leídos por un humano (Rabuñal y Serantes 2006, p. 36).

1.6.2 Sensores de temperatura

Son dispositivos encargados de transformar los cambios de temperatura en señales eléctrica, como se puede apreciar en la Figura 13-1.

Los instrumentos más utilizados en la industria son:

- **Termistor:** basado en la variación de la resistencia eléctrica que experimenta un material semiconductor cuando es sometido a un cambio de temperatura
- **Termorresistencias:** basado en la variación de la resistencia eléctrica cuando hay un cambio de temperatura.
- **Pirómetros:** miden la temperatura sin necesidad de estar en contacto con el
- **Termopares:** basado en la unión de dos metales diferentes que genera una fuerza electromotriz función de la temperatura (VAM INDUSTRY 2016, p. 11-12).

1.6.3 Termopar o termocupla

Cuando se expone al calor los extremos de dos semiconductores o metales conectados por una junta o soldadura, obtenemos un novedoso efecto generando la aparición de una diferencia de potencial, una corriente muy pequeña que depende de la temperatura (USERS 2014, p. 43-44).

Dependiendo de la cantidad de calor generado por una fuente aplicada sobre esta junta, obtendremos tensiones distintas, que utilizan para determinar la temperatura de la fuente. El efecto producido se conoce como Termocupla o termopar. Se puede observar que existen un sinnúmero de variedades de termocupla en el mercado, cada una sirve para distintas mediciones en diferentes ambientes (USERS 2014, p. 43-44).



Figura 13-1: Diferentes tipos de termocuplas.

Fuente: (USERS, 2014).

Algunos tipos de termocuplas se detallarán a continuación:

- **Tipo K:** Cromel (aleación Niquel/Cromo)- Alumel (aleación Niquel/Aluminiol) ,bajo costo y variedad de sondas para varias aplicaciones. Mide rango de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+1372\text{ }^{\circ}\text{C}$.
- **Tipo E:** Cromel- Constantán (aleación Cobre/ Niquel). No es magnético y tolera muy bajas temperaturas. Posee una sensibilidad $68\mu\text{V }^{\circ}\text{C}$.
- **Tipo T:** Cobre- Constantán. Recomendado para mediciones de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a 260°C . Es utilizada en la mayoría de los ambientes.
- **Tipo N:** Nicrosil (aleación Niquel/Cobre/Silicio) – Nisil (Niquel/Silicio).Se lo utiliza en mediciones a alta temperatura gracias a que, en esas condiciones, posee estabilidad en todas sus propiedades.
- **Tipo B:** Platino- Rodio. Presenta buenas mediciones para temperaturas superiores a los $1800\text{ }^{\circ}\text{C}$, pero, de 0 a $42\text{ }^{\circ}\text{C}$, no presenta mediciones; su uso se limita a bajas temperaturas. (USERS 2014, p. 45).

1.7 Láser

1.7.1 Definición

Un rayo láser es un dispositivo que utiliza uno de los efectos de mecánica cuántica, más precisamente la emisión inducida o estimulada de partículas, para generar un haz de luz coherente de un medio adecuado y con el tamaño, la forma y la pureza que deseemos (EspacioMarketing, 2014).

1.7.2 Corte con láser

Los láseres transmiten energía en forma de fotones coherentes dentro de una cámara con dos espejos en sus extremos, en donde las radiaciones luminosas rebotan y se amplifican. El material se vaporiza y es expulsado, dejando un borde con un acabado superficial de alta calidad. La energía fuertemente orientada de un láser puede producir anchos de corte muy estrechos, especialmente en materiales delgados, como se muestra en la Figura 14-1 (EspacioMarketing, 2014).

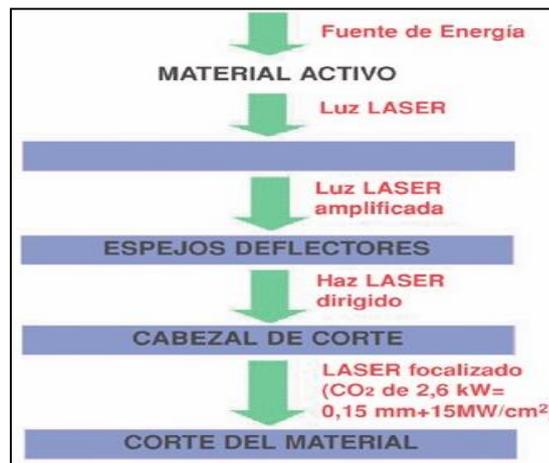


Figura 14-1: Diagrama del corte con láser.

Fuente: <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/comparacion-de-tecnologias-de-corte-termico-mecanizado>.

1.7.3 Tubo de láser de CO₂

Tubos láser de CO₂ para equipos láser para grabado y corte de materiales que poseen excelente estabilidad, calidad y baja tasa de error. Se aplican en máquinas de corte y grabado por láser en diferentes industrias (Megalaser, 2016).

Especificaciones:

- Precisión de corte y grabado.
- Variedad de potencias para trabajos de cualquier escala.
- Velocidad de procesamiento.
- Mayor vida útil.
- Enfriamiento por agua.

- País de origen: China.
- Certificaciones: CE, carta técnica. (Megalaser, 2016).

1.7.4 Rendimiento y aplicación

Nuestros tubos láser de CO₂ son un accesorio para equipos láser que se caracterizan por su estabilidad, calidad y baja tasa de error. Para aplicación en máquinas de corte, grabado y marcado láser en diferentes industrias y en trabajos de cualquier escala, como: publicidad, textil, materiales decorativos, construcción (Megalaser, 2016).

1.7.5 Ventajas

Estabilidad: Diseñados con equipo especial y gas importado para mayor estabilidad láser, reduciendo la disgregación del gas, prolongando su vida útil (Megalaser, 2016).

Gran potencia: Insumos con potencia láser superior que comienzan por encima de los 70W (Megalaser, 2016).

Gran versatilidad: El aparato láser de CO₂ puede utilizarse en el grabado por láser, corte por láser, perforación por láser, procesamiento de moldes por láser y muchos más (Megalaser, 2016).

1.8 Sistema de Enfriamiento por agua

Se optara por diseñar un sistema de bajo costo para la empresa, que simule las condiciones adecuadas para una correcta refrigeración del tubo láser de CO₂ de una maquina CNC. Para esto se considera dos puntos primordiales, que son el sistema de enfriamiento del agua y el circuito de la misma cuyo componente principal es una bomba la cual enviara el agua a un radiador (Cazco y Gordón 2015, p. 142).

1.8.1 Sistema de Enfriamiento chiller

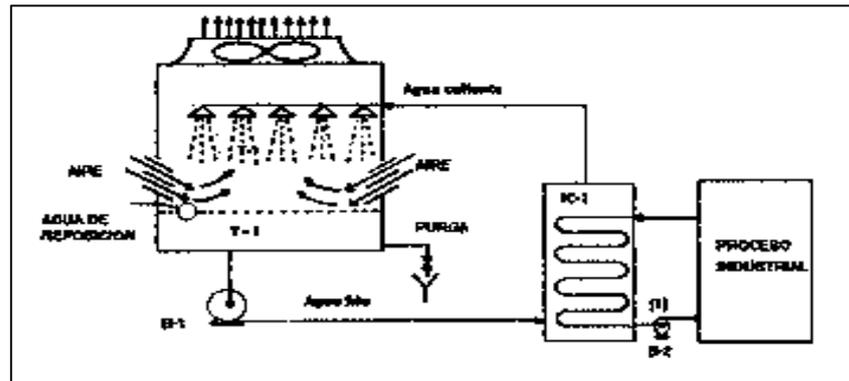


Figura 15-1: Sistema de Enfriamiento Chiller.

Fuente: <https://www.quiminet.com/articulos/sistemas-de-enfriamiento-del-agua-2560810.htm>

Este tipo de sistema costa con las siguientes partes:

- Líquido a Enfriar (Aceite o Agua)
- T-1 Torre de Enfriamiento
- B-1 Bomba de Agua Fría
- Ic-1 Intercambiador de Calor
- B-2 Bomba de Líquido de Enfriamiento (Quiminet, 2016).

En este tipo de sistema el agua enfriada se bombea a un intercambiador de calor y este se retorna nuevamente a la torre de enfriamiento. En el intercambiador de calor se lleva a cabo a la transferencia de calor entre el agua enfriada y un líquido que podría ser un aceite o alguna salmuera, este líquido es bombeado al proceso y retornado al intercambiador de calor, como se puede apreciar en la Figura 15-1 (QuimiNet, 2016).

1.8.2 Sistema de enfriamiento con radiador

El radiador sirve para enfriar el líquido de refrigeración como agua destilada. El líquido se enfría por medio del aire que choca contra la superficie metálica del radiador, está formado por dos depósitos, uno superior y otro inferior, también pueden estar en los laterales. Ambos están unidos entre sí por una serie de tubos finos rodeados por numerosas aletas de refrigeración, o por una

serie de paneles en forma de nidos de abeja que aumentan la superficie radiante de calor, como se puede apreciar en la Figura 16-1 (Análisis, 2014).

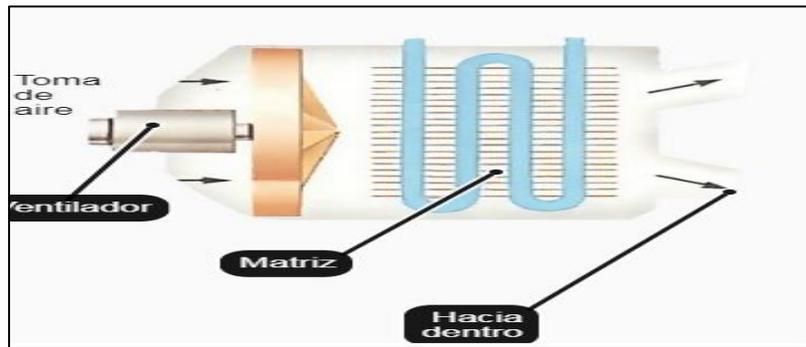


Figura 16-1: Sistema de Enfriamiento con Radiador.

Fuente: <https://www.comofuncionaunauto.com/aspectos-basicos/como-funciona-el-sistema-de-refrigeracion-del-motor>.

Tanto los tubos y aletas como los paneles se fabrican en aleación ligera, facilitando, con su mayor conductibilidad térmica, la rápida evacuación de calor a la atmósfera. El depósito superior lleva una boca de entrada que se comunica por medio de un manguito de goma con la salida caliente de agua de la culata del motor. En el depósito inferior va instalada la boca de salida del agua refrigerante, unida por otro manguito de goma a la entrada de la bomba (Análisis 2014, p. 12).

1.9 Filtros

Un filtro es un proceso computacional o algoritmo mediante el cual una señal digital (secuencia de muestras) es transformada en una segunda secuencia de muestras o señal digital de salida (Gómez 2010, p. 2).

1.9.1 Filtro de la media

De acuerdo a Márquez (2016, p.1), El filtro mediana consiste en asignar a cada punto el valor de la mediana local (muestras alrededor de cada valor de la señal) o sea $f(x) = Y_{med}$; sólo cambian aquellos valores que no corresponden a la mediana de la muestra. La mediana de un conjunto de muestras $Y = \{Y_i\}_{i=1}^N$ puede también definirse implícitamente como la muestra $Y_{med} \in X$ que minimiza la norma L_1 definida como:

$$\sum_{i=1}^N |Y_i - Y_{med}|$$

1.9.2 Filtro Savitzky-Golay

Un filtro de Savitzky-Golay es una forma de filtro digital que puede ser aplicado a un conjunto de datos digitales con el propósito de suavizar los datos, es decir, incrementar la relación de señal a ruido sin distorsionar considerablemente la señal que se está tratando. Se logra en un proceso conocido como convolución, ajustando porciones más pequeñas de datos adyacentes con un polinomio de bajo orden utilizando el método de mínimos cuadrados lineales. Cuando los puntos de datos están igualmente espaciados, una solución analítica a las ecuaciones de mínimos cuadrados pueden ser encontradas, en la forma de una sola convolución de coeficientes que puede ser utilizado a todas las porciones más pequeñas de datos. Con el objetivo de obtener una estimación de la señal suavizada en el punto central de cada porción de datos (Casignia 2016, p. 93).

1.10 Ecuación de transferencia de calor

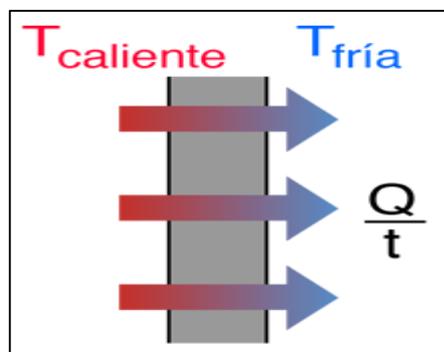


Figura 17-1: Transferencia de calor.

Fuente: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/thermo/heatra.html>.

Como se puede apreciar en la Figura 17-1, la transferencia de calor se produce normalmente desde un objeto con alta temperatura, a otro objeto con temperatura más baja. La transferencia de calor cambia la energía interna de ambos sistemas implicados, de acuerdo con la primera ley de la Termodinámica. La conducción es la transferencia de calor, por medio de la excitación molecular en el interior del material, sin ningún tipo de movimiento entre los objetos (Olmo 2006, p. 1).

La ecuación está dada por:

$$\frac{Q}{t} = \frac{k \cdot A(T_{caliente} - T_{fria})}{d}$$

Q = Calor transferido en el tiempo = t

K = conductividad térmica de la barrera.

A = área.

T = Temperatura.

d = grosor de la barrera.

1.11 Características de la respuesta transitoria

Los parámetros característicos de la respuesta transitoria de un sistema según Ogata son:

- Tiempo de Retardo T_d : Tiempo para alcanzar por primera vez la mitad del valor final.
- Tiempo de Levantamiento T_r : Tiempo para pasar del 10 al 90%, del 5 al 95% ó del 0 al 100% del valor final.
- Tiempo Pico T_p : Tiempo para el primer pico.
- Sobrepasso Máximo M_p : Valor pico máximo medido a partir de la unidad.
- Tiempo de Asentamiento T_s : Tiempo para alcanzar un rango alrededor del valor final, especificado por el porcentaje absoluto. Por lo general de 2 a 5% (Ogatha 2010, p. 6).

1.12 Raíz del error cuadrático medio (RMSE)

De acuerdo a Gestión de Operaciones e Investigación (2015, p. 1), dice que el RMSE es una medida de desempeño cuantitativa utilizada comúnmente para evaluar métodos de pronóstico de demanda, consiste en la raíz cuadrada de la sumatoria de los errores cuadráticos. En comparación con la Desviación Media Absoluta el RMSE amplifica y penaliza con mayor fuerza aquellos errores de mayor magnitud. La fórmula de cálculo del RMSE se muestra a continuación la ecuación 2:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2} \quad (2)$$

CAPITULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

A continuación se presenta la construcción del sistema de enfriamiento para un tubo láser de CO₂, el control del sistema se basa en lógica difusa bajo distintos métodos de inferencia. En el apartado se realiza la selección de elementos, diseño de la estructura, construcción del sistema, diseño del controlador de enfriamiento clásico y difuso e implementación de los controladores.

2.1 Requerimientos del sistema de enfriamiento

El tubo de láser de CO₂ utilizado como herramienta de corte de una máquina CNC requiere del cumplimiento de condiciones para su protección y cumplimiento de su vida útil. La temperatura es el factor bajo el cual se puede calificar la buena operación del tubo láser. Según TIMG (2016) una empresa chilena dedicada al ensamble y venta de equipos de impresión y corte entre ellos los de tipo láser, indica que una diferencia de temperatura entre el tubo y el ambiente, mayor 30°C puede ocasionar su quiebre. Así como también una temperatura mayor a los 37°C aproximadamente del líquido refrigerante en condiciones de ambiente normal esto es entre 15-25°C que se corresponde con el rango de temperatura óptimo del refrigerante en la operación del tubo láser. Es necesario también controlar que el líquido este circulando constantemente en el sistema de lo contrario no se produce el enfriamiento. El volumen del refrigerante en el depósito debe ser como mínimo de 5 litros. Otra condición para el buen funcionamiento es la ubicación del sistema este debe hallarse en un entorno libre de otro equipo emisor de calor. Bajo los requerimientos mencionados se realiza el diseño y construcción del sistema de enfriamiento para el tubo laser de CO₂.

En la Figura 1-2 se muestra el tubo láser de CO₂ de alta potencia utilizado en este trabajo. Los materiales sobre los cuales realiza corte y grabado son: papel, fomix, cartón, goma, tela, cuero, MDF, cerámica y acrílico (Tubo de láser de CO₂ de 100W, 2018).

Tabla 1-2: Requerimientos del sistema

Requerimientos del sistema de enfriamiento	Condiciones
Temperatura óptima del refrigerante	Entre 15-25°C.
Caudal	Constante entre 4-6 l/min.
Alarma y Paro	Si sobrepasa los 25°C o el flujo del refrigerante se detiene.
Indicador	Mostrar la temperatura y caudal en tiempo real.
Deposito del refrigerante	Mínimo 5 litros.
Activación	Independientes: bomba, ventilador y controlador.
Ambiente	Libre de otro equipo emisor de calor.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.



Fotografía 1-2: Tubo láser de CO2

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Las especificaciones del tubo laser se muestran a continuación:

- Potencia: 100W.
- Longitud: 1400mm.
- Diámetro: 80mm.
- Temperatura: 15-25 °C.
- Peso Neto: 4,0 kg.
- Caudal del Refrigerante: 4-6l/min.
- Corriente máxima: 28mA.
- Vida Útil: 10000 horas (Tubo de láser de CO2 de 100W, 2018).

2.2 Construcción del sistema de enfriamiento

A continuación se detalla los componentes del sistema de enfriamiento seleccionados y la construcción del mismo.

2.2.1 Elementos del sistema de enfriamiento

2.2.1.1 Bomba de diafragma



Fotografía 2-2: Bomba de agua

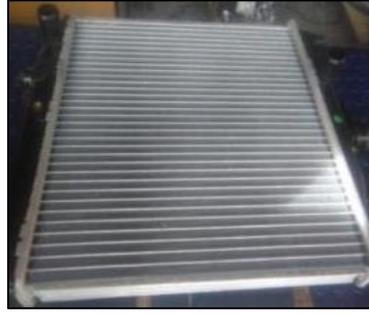
Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018..

La bomba de diafragma mostrada en la Fotografía 2-2 se caracteriza por su tamaño pequeño y de alta presión. Además contiene un interruptor de presión que se acciona dependiendo de la presión de salida del agua contribuyendo con la conservación de la energía (Bomba de Diafragma 12v, 2018).

Se muestran sus especificaciones a continuación:

- Voltaje : 12V(9-14.4V).
- Corriente: 6A.
- Potencia: 70W.
- Caudal: 6 l/min.
- Presión de funcionamiento: ~ 130 PSI (0.9MPA).
- Material: plástico.
- Tamaño: Aprox. 16.5 x 9.5 x 6 cm (L * W * H).
- Peso: 598g.

2.2.1.2 Radiador



Fotografía 3-2: Radiador.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

En la Fotografía 3-2 se observa el radiador utilizado en la planta de enfriamiento. Se caracteriza por su tamaño pequeño dentro de los radiadores de autos (Radiadores ACC, 2018). Sus características son:

- Trasmisión: Automatico.
- Material: Aluminio y Plastico.
- Tipo: Laminilla.
- Panal: 33 X 31.8 cm.
- Tanques: 34.7 X 5 cm.

2.2.1.3 Ventilador



Fotografía 4-2: Ventilador

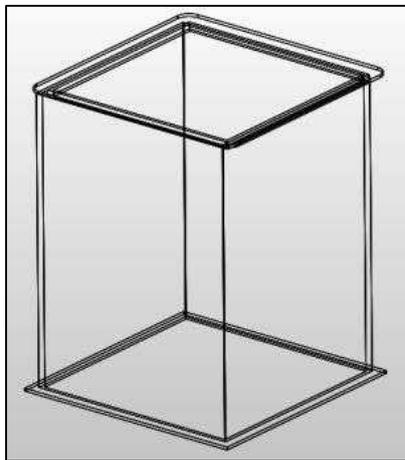
Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

El ventilador que se encuentra en la Fotografía 4-2, es complemento propio del radiador antes descrito (Ventilador, 2018).

Sus especificaciones se muestran a continuación:

- Peso: 4.00 lb.
- Voltaje: 12V.
- Corriente: ~10 A.
- Color /acabado del Protector: Negro.
- Material del protector: Acero estampado.
- Material del del aspa del ventilador: Plastico con fibra de vidrio.

2.2.1.4 Depósito de agua



Fotografía 5-2: Depósito de agua

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

El depósito de agua se lo puede observar en la Fotografía 5-1, se realizó su diseño en el software SolidWorks de acuerdo a los requerimientos del sistema. Se optó como material de la fuente el acrílico por su durabilidad y estética. Está protegido con una tapa para evitar el ingreso de impurezas. Otras de las características del depósito son:

- Altura: 30cm.
- Ancho: 16 cm.
- Largo: 16 cm.
- Volumen: 7680 cm^3 ó 7.68 l cm.

2.2.1.5 Fuente de alimentación



Fotografía 6-2: Fuente de alimentación

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se utiliza la fuente de alimentación conmutada como se muestra en la Fotografía 6-2, para el encendido de la bomba y del ventilador, porque se requiere bastante corriente para poner en marcha ambos componentes (Fuente de Poder 12V-20, 2018).

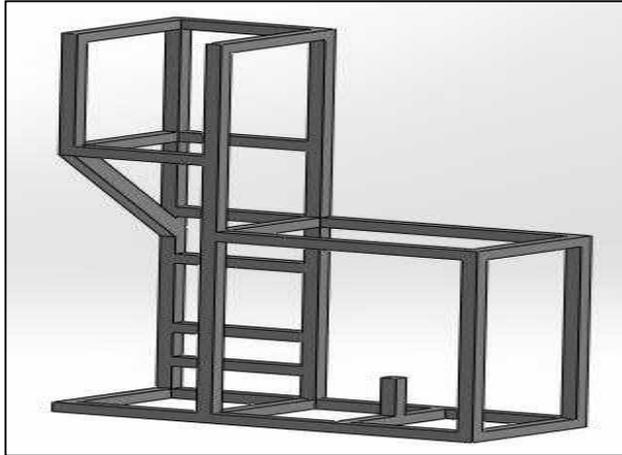
La corriente total de consumo es de $6\text{ A} + 10\text{A} = 16\text{A}$.

Por esta razón se seleccionó este tipo de fuente que tiene las siguientes características:

- Voltaje de Entrada: 110/220 15% AC.
- Voltaje de Salida: 12V DC.
- Corriente: 20A.
- Frecuencia: 50Hz.
- Potencia Máxima de Salida: 240W.
- Tamaño: 20 x 5 x 10.8 cm.

2.2.2 Implementación del sistema de enfriamiento

Podemos observar en las Fotografía 7-2 el diseño de la estructura del sistema de enfriamiento. Se utiliza como material de la estructura tubo metálico. En las Fotografía 8-2 y 9-2 se observa el montaje de los elementos en la estructura.



Fotografía 7-2 Diseño de la estructura de la planta

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.



Fotografía 8-2: Montaje del radiador y ventilador.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.



Fotografía 9-2: Montaje de la bomba de diafragma y la fuente.

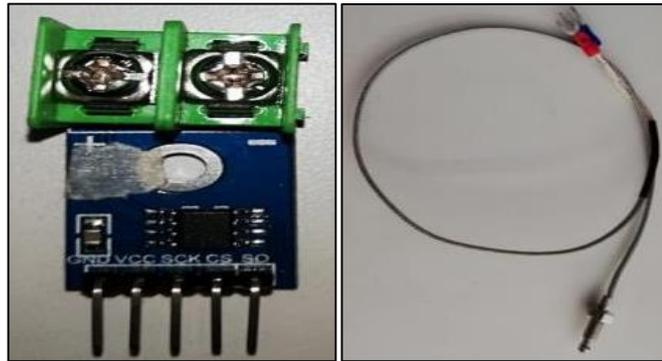
Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

2.3 Construcción del controlador de temperatura del sistema de enfriamiento

A continuación se detalla los componentes del controlador del sistema de enfriamiento seleccionados, la construcción del mismo y algoritmo de control utilizado.

2.3.1 Elementos del controlador del sistema

2.3.1.1 Módulo de Sensores de temperatura



Fotografía 10-2:a) Módulo de sensor de temperatura

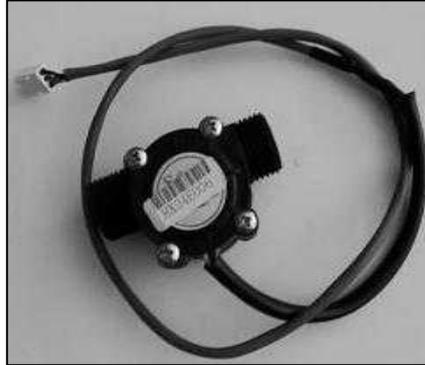
b) Termopar tipo K.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Como se puede apreciar en la Fotografía 10-2, el módulo de sensor MAX6675 está diseñado para utilizar junto con un termopar tipo K. Se utiliza para la medición de la temperatura de la entrada y salida del tubo láser de CO₂ las cuales se podrán apreciar en una pantalla LCD (Módulo sensor temperatura MAX6675 termopar tipo K, 2018).

- Voltaje de funcionamiento: 3.3~5v.
- Rango de medición: 0~800°C.
- La señal de temperatura puede ser convertida en 12 bits digitales.
- Resolución de la temperatura de: 0,25 grados.
- Comunicación: SPI.
- La temperatura de operación de la tarjeta: -20°C a 80°C.

2.3.1.2 Sensor de flujo de agua



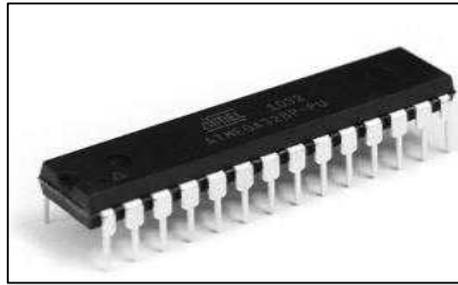
Fotografía F11-2: Sensor de flujo.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Como se muestra en la Fotografía 11-2, es un sensor de flujo que da aviso si existe circulación de agua en el sistema caso contrario se activa la alarma y se detiene el sistema (Sensor de Flujo, 2018).

- Alimentación: 4.5V a 24V.
- Corriente: 15mA.
- Flujo: 1~30 Litros/minuto.
- Capacidad de Carga: =10mA (DC 5V).
- Temperatura Operativa: <80°C.
- Temperatura del Líquido: <120°C.
- Humedad Operativa: 35%~90%RH.
- Presión de Agua: 1.75MPa max.
- Rosca, diámetro interior: 10mm.
- Rosca, diámetro exterior: 19mm.

2.3.1.3 Microcontroladores

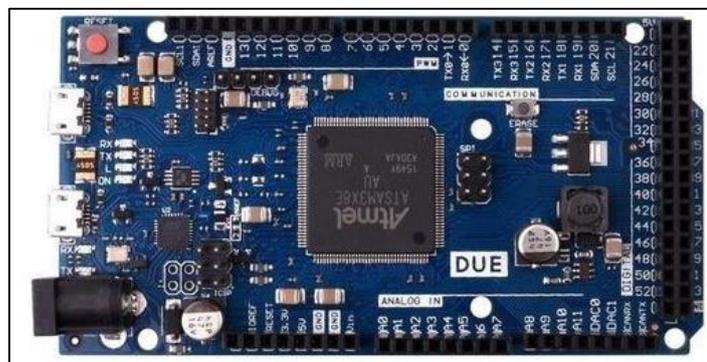


Fotografía 12-2: Microcontrolador.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Microcontrolador ATMEGA328P como se encuentra en la Fotografía 12-2, es fabricado por Atmel (Microchip). Pertenece a la familia AVR con arquitectura RISC de 8 bits. Se utiliza para la lectura de los módulos de temperatura y de caudal. El cual tiene unas características específicas que nos sirven para poder realizar dichas tareas (ATMEGA328P Microcontrolador AVR, 2018).

- Voltaje de operación: 1.8 a 5.5 VDC.
- Memoria flash: 32 KB.
- Memoria RAM: 2 KB.
- EEPROM: 2 KB.
- Frecuencia de operación: 20 MHz.
- Pines de IO: 23.
- Canales ADC: 10.
- Interfaces: UART, TWI, SPI.
- Temperatura de Operación: -40° a 85° C.



Fotografía 13-2: Arduino Due.

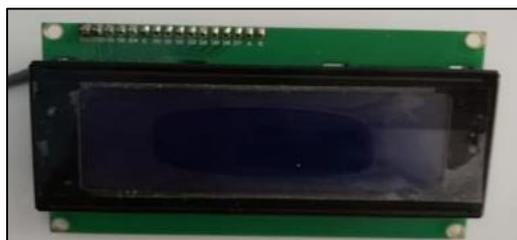
Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

A demás de utilizar el microcontrolador ATMEGA328P se utilizamos un Arduino Due como se muestra en la Fotografía 13-2, es una tarjeta con un poderoso microcontrolador de 32 bit CortexM3 ARM que incrementa el poder de procesamiento de datos. Además se debe diferenciar de otras tarjetas de Arduino porque esta trabaja con voltaje de 3,3V, pudiendo tolerar un voltaje máximo en sus pines I/O de 3.3V (Arduino Due, 2014).

Este controlador se emplea para programar cada uno de los diferentes controladores difusos y para la comunicación con los sensores (Arduino Due, 2014).

- Microcontrolador: AT91SAM3X8E.
- Voltaje de operación: 3.3V.
- Voltaje recomendado de entrada (pin Vin): 7-12V.
- Pines de entrada y salida digitales: 54 pines I/O, de los cuales 12 proveen salida PWM.
- Pines de entrada análogos: 12.
- Pines de salida análogos: 2.
- Corriente de salida total en los pines I/O: 130mA.
- Corriente DC máxima en el pin de 3.3V: 800mA.
- Corriente DC máxima en el pin de 5V: 800mA.
- Memoria Flash: 512 KB toda disponible para aplicaciones del usuario.
- SRAM: 96 KB (en dos bancos de: 64KB y 32KB).
- Velocidad de reloj: 84 MHz.

2.3.1.4 Pantalla de cristal líquido (LCD)



Fotografía 14-2: LCD.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Es una pantalla de LCD como se muestra en la Fotografía 14-2, se utiliza para ver la temperatura de entrada en tiempo real, en la que se encuentra circulando el agua en el tubo láser de CO₂. Es un indicador donde se podrá observar esta variación (Display LCD 16x2, 2018).

- 16 Caracteres x 2 líneas.
- Caracteres de 5x8 puntos.
- Tamaño de carácter: 5.23 x 3 mm.
- Puede mostrar letras, números, caracteres especiales, y hasta 8 caracteres creados por el usuario.
- Luz de fondo de LED color azul.
- Caracteres color blanco.
- Interface paralela.
- Puede operar en modo de 8 bits, o de 4 bits para ahorrar pines del microcontrolador.
- Voltaje de alimentación: 5 V.

2.3.1.5 Fuente para el controlador



Fotografía 15-2: Fuente.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La fuente como se muestra en la Fotografía 15-2, es únicamente para la alimentación de la parte de control, en donde tenemos los microcontroladores y la tarjeta de Arduino. Due sus principales características son:

- Entrada: 110V.
- Salida: 1.5-12VDC.
- Corriente: 500mA max.

2.3.1.6 Buzzer



Fotografía 16-2: Buzzer.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La bocina que se observa en la Fotografía 16-2, se activa al existir un error en el sistema. Indicando que algo no está funcionando correctamente («Zumbadores Piezocerámicos «Buzzers»» 2018).

- Peso: 14 g
- Color: negro.
- Temperatura de trabajo: $-20 +70^{\circ}\text{C}$.
- Tensión de trabajo: 3-24 VDC.
- Tensión nominal: 12 VDC.
- Frecuencia de resonancia: 3 kHz.
- Corriente máxima: 10 mA.
- Nivel sonoro: 90 dB a 30 cm.
- Longitud cable: 90 cm.

2.3.1.7 Gabinete para tablero de control



Fotografía 17-2: Gabinete.

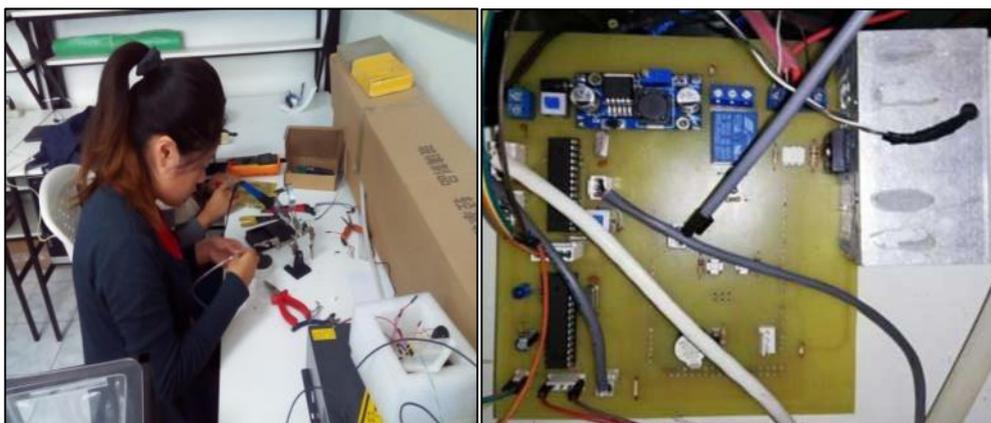
Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Es una caja de material galvanizado de color crema como se muestra en la Fotografía 17-2, que protege el tablero principal donde se encuentra el controlador la fuente, la etapa de potencia y los demás componentes que conforma el sistema. Cuenta con tapa y seguro para que solo personal autorizado pueda tener acceso a los componentes (Gabinete, 2018).

2.4 Implementación de la tarjeta de control

Se realiza el diseño de la placa del circuito de control en el software de diseño electrónico Proteus 8 Professional.

A continuación se establece dos entradas de alimentación tanto para la etapa de control como para la etapa de potencia. La lectura de las señales de los sensores de temperatura como de caudal se lo hace a través del Atmega 328P donde se programa un filtro de media con una ventana de tamaño 6 para la reducción del ruido en la lectura de los sensores. Esta información es enviada a la tarjeta de control Arduino Due a través de una comunicación serial. Un segundo Atmega 328P se utiliza para aumentar la señal de frecuencia emitida desde la tarjeta de control CNC para la activación del láser. Se incrementa el conector para la bocina de alarma del sistema. Un LCD permite observar las variaciones de temperatura en el sistema. Se utiliza un Mosfet IRFP250 en la etapa de potencia junto con un disipador para la activación del ventilador, como se puede apreciar en la Fotografía 18-2.



Fotografía 18-2: Implementación de la PCB

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

2.5 Etapas de diseño de los controladores

El desarrollo de los controladores se divide por etapas. Iniciando por la obtención del modelo matemático del sistema para esto se realiza el análisis del ventilador, radiador, planta y termocupla. Una vez obtenida la función de transferencia se diseña un controlador clásico PI mediante el método de la curva de Zingler&Nichols. Seguidamente se diseña los controladores difusos utilizando las metodologías de Mamdani y TSK para su posterior comparación. Finalmente se desarrolla un controlador basado en el clásico PI con la diferencia que sus constantes de ganancia son variables. Este proceso se puede observar en la Figura 1-2.

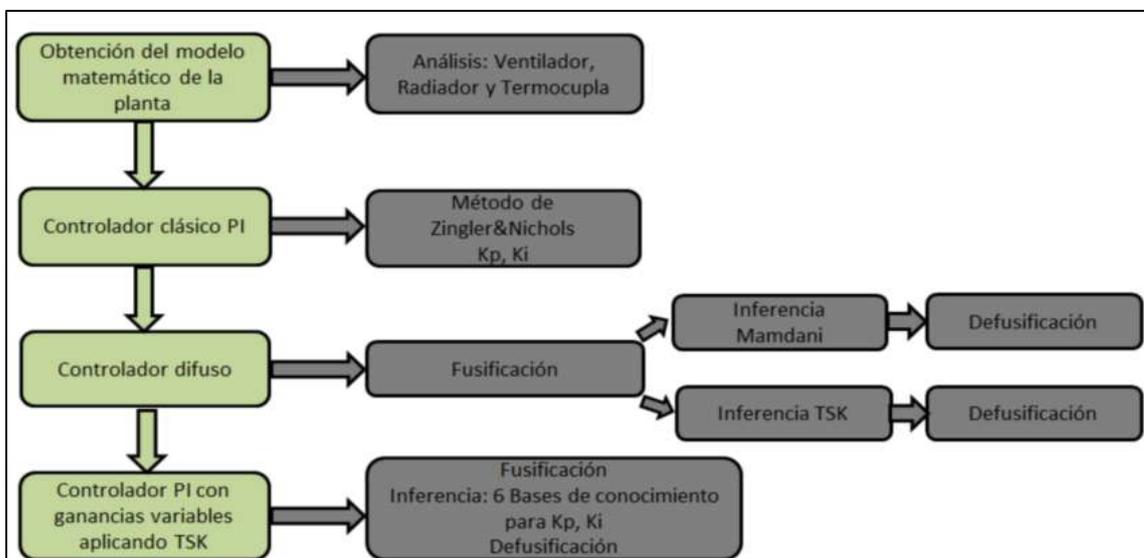


Figura 1-2: Etapas de diseño de los controladores.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

2.5.1 Modelo matemático del sistema de enfriamiento

2.5.1.1 Ventilador

Para el análisis del comportamiento del ventilador bajo distintos niveles de energía se emplea una señal PWM con ciclo de trabajo variante. La señal PWM se genera a través de un microcontrolador (Arduino UNO) donde se programa un incremento del porcentaje del ancho de pulso de la señal en un 10% cada 10s. Por medio de un segundo microcontrolador del mismo tipo, un imán adherido al aspa del ventilador y un sensor de Efecto Hall KY-035, se realiza la recolección de datos para el cálculo de la velocidad del ventilador a medida que la señal PWM va

cambiando. Se establece un tiempo de muestreo de 1s de tal forma se obtiene 10 datos de velocidad en cada incremento del ciclo de trabajo del PWM. En el proceso se identifica el porcentaje mínimo en el cual el ventilador entra en funcionamiento. Al notar una variación superior en la respuesta después de alcanzar el 90% del ciclo de trabajo, se disminuyen los incrementos de porcentaje para identificar el nivel donde el comportamiento de la velocidad es menos lineal. Se promedian los valores obtenidos y se resumen en la tabla 2-2:

Tabla 2-2: Variación de velocidad del ventilador al variar el ciclo de trabajo del PWM.

Duty Cycle PWM	RPM
0%	0
10%	0
20%	0
30%	0
35%	900
40%	1080
50%	1440
60%	1800
70%	2160
80%	2520
90%	2880
93%	3060
95%	3360
97%	4020
100%	4140

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Por medio de la hoja de cálculo de Excel se grafica el comportamiento de la velocidad del ventilador frente a la variación de PWM mostrada en la Figura 2-2. Se identifica que entra funcionamiento el ventilador cuando la señal alcanza un ciclo de trabajo mayor o igual al 35%. Se observa una tendencia lineal en la respuesta cuando el ciclo de trabajo está entre el 35% y 93% sobre estos valores el comportamiento de la velocidad se eleva bruscamente cambiando la tendencia lineal en la respuesta.

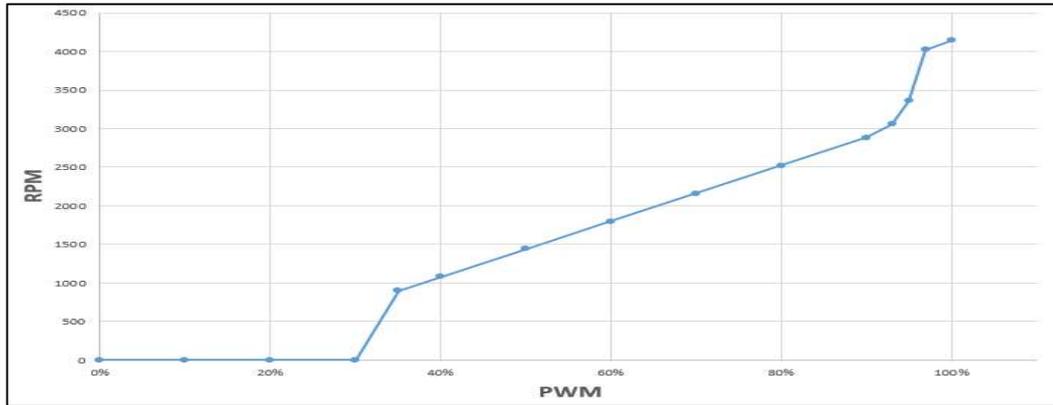


Figura 2-2: Curva de respuesta de la velocidad del ventilador frente a la variación del ciclo de trabajo del PWM.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se limita el rango de operación del ventilador dentro del 35% y 93%. La respuesta restringida se puede aproximar a la línea de tendencia correspondiente a la ecuación 3:

$$y = 3659.2x - 389.36 \quad (3)$$

Con un $R^2 = 0,9993$ que es el índice de determinación, dado por la hoja de cálculo Excel para indicar el nivel de ajuste de los datos al modelo lineal. Al obtener un valor relativamente cercano a uno se establece un alto nivel de aproximación lineal de la curva de repuesta del ventilador en dicho rango.

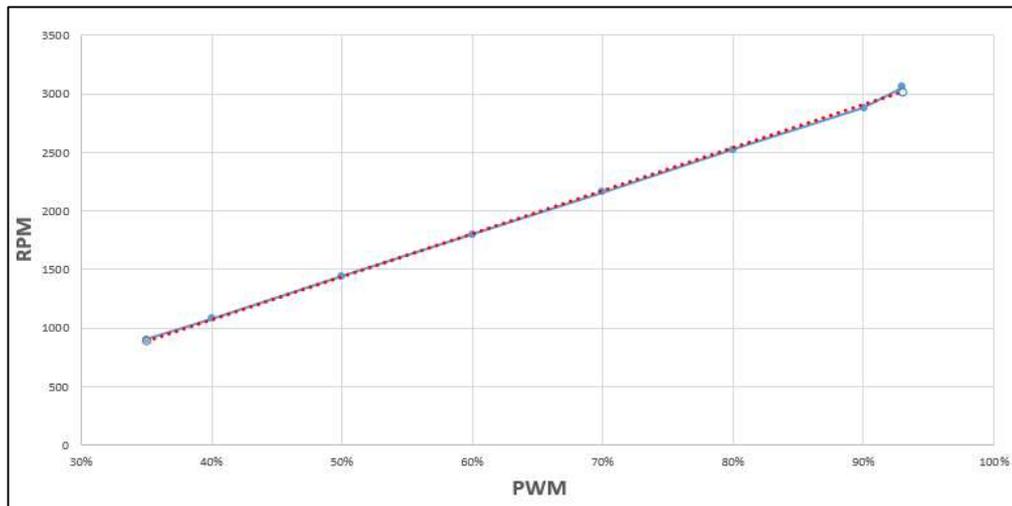


Figura 3-2: Parte lineal de la curva de velocidad del ventilador frente a la variación del ciclo de trabajo del PWM.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

2.5.1.2 Radiador

Para conocer el efecto del radiador en el sistema de enfriamiento aislado del funcionamiento del ventilador, se realiza un proceso de recolección de valores de temperaturas de entrada y salida. Para ello se adaptan dos sensores de temperatura, uno a la entrada del radiador y otro a la salida del mismo, los sensores utilizados son las termocuplas tipo k. Seguido la bomba es puesta en marcha haciendo recorrer el agua a través del sistema. Una vez el agua que atraviesa se encuentra en condiciones óptimas, esto es sin la aparición de burbujas, se activa la luz láser desde el programa que lo controla Universal Gcode Sender. A medida que la temperatura va subiendo se registran los valores por medio de los sensores y un microcontrolador (ARDUINO UNO) con un tiempo de muestreo de 0.2s por 232.8s. Obtenidos los valores se utiliza el software Matlab para procesar los datos. Se disminuye el efecto del ruido de la señal través de la función del filtro de Savitzky-Golay. Las señales son graficadas y se muestran en la Figura 4-2.

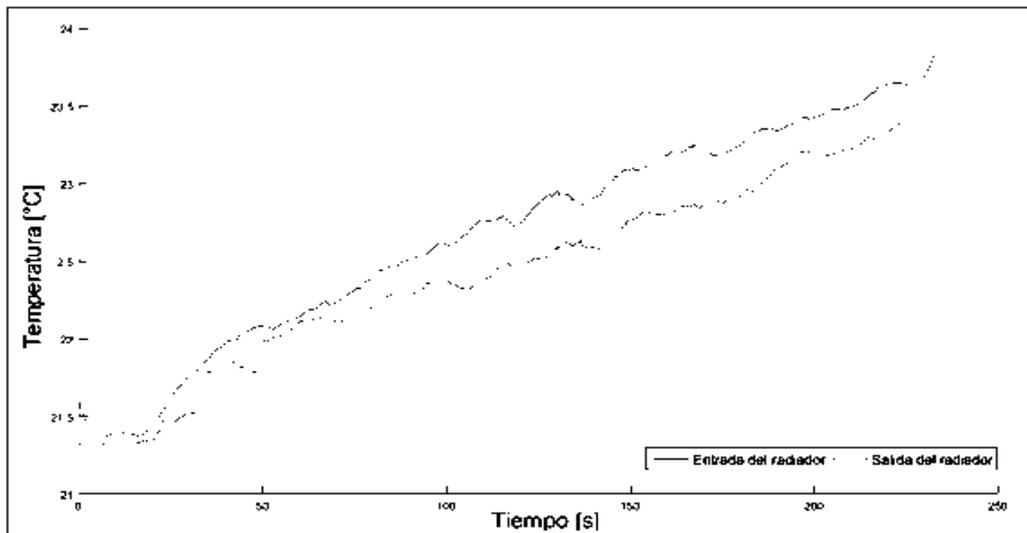


Figura 4-2: Temperatura de entrada y salida del agua en el radiador de sistema de enfriamiento.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se procede a calcular el porcentaje de variación de cada temperatura de salida con respecto a la temperatura de entrada aplicando la ecuación 4:

$$\%V = \frac{T_e - T_s}{T_e} * 100 \quad (4)$$

Donde $\%V$ es el porcentaje de variación, T_e corresponde al valor de temperatura de entrada al radiador y T_s al valor de temperatura de salida del radiador. De los porcentajes de variación calculados en cada tiempo de muestreo, esto es 1164 valores de variación, se obtiene una variación

promedio del 1,036%. Al ser un porcentaje de variación relativamente bajo se demuestra una proximidad considerable entre los valores. Así se establece que se produce un bajo efecto del radiador en el tiempo en el enfriamiento cuando el ventilador no entra en funcionamiento por tanto se centra el análisis de la respuesta del sistema de enfriamiento bajo el efecto del ventilador.

2.5.1.3 Planta

Para la identificación del modelo matemático de la planta se procede utilizar el método experimental, a través de la recolección de datos de respuesta frente a señales de entrada del tipo escalón. Se utiliza las hojas de cálculo de Excel y el software matemático Matlab para el análisis y procesamiento de los valores obtenidos.

Para conocer la dinámica del sistema se aplica una entrada del tipo escalón establecida por una señal PWM dentro del rango con tendencia lineal del ventilador. Se recolectan los datos de respuesta de temperatura con los que responde el sistema. Este proceso inicia con la activación de la circulación del agua a través del sistema, una vez el agua en condiciones óptimas esto es sin burbujas de tamaño considerable, se procede al encendido del tubo láser. Una vez que la temperatura del agua ha alcanzado los 25°C se introduce un PWM con ciclo de trabajo del 35% y la temperatura se va estabiliza en los 24.5°C a la salida del sistema de enfriamiento. Una vez más se ingresa una entrada escalón de PWM con ciclo de trabajo del 93% y la temperatura llega a estabilizarse en 19.5°C. Se observa ruido en la señal de respuesta por tanto se utiliza el filtro de Savitzky-Golay de Matlab para quitar tal efecto y analizar el comportamiento claramente. En la Figura 5-2, se observa la curva de respuesta filtrada y sin filtrar esta se la llevada al origen para poder encontrar la función de transferencia.

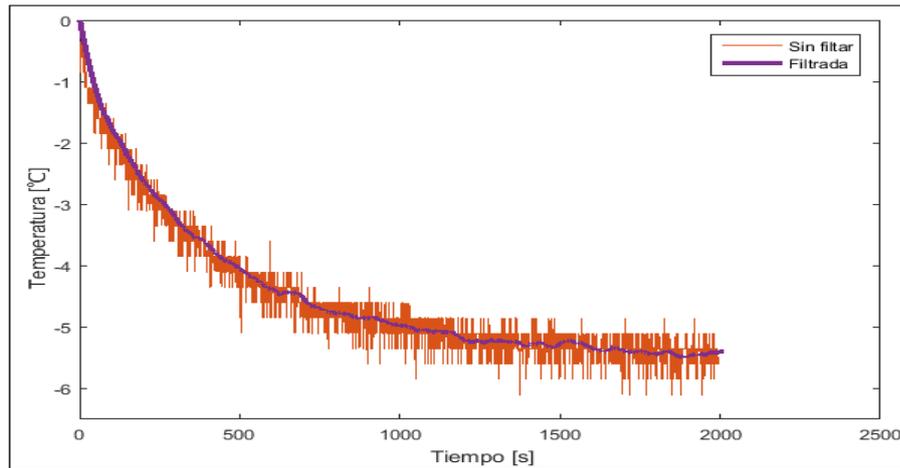


Figura 5-2: Curva de respuesta filtrada y sin filtrar.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se puede establecer el comportamiento del sistema como de primer orden, correspondiente a la siguiente función de transferencia.

$$\frac{K}{\tau s + 1}$$

Donde K corresponde a la ganancia del proceso y τ es la constante de tiempo del sistema. Para calcular la ganancia K se divide el valor final de la salida V_{out} para el valor del escalón final de entrada V_{in} . El valor del escalon es del 58% del ciclo de trabajo del PWM obtenido de la diferencia del 93% y 35% llevando el escalón al origen. Se trabaja con el ciclo de trabajo dentro del rango de 0 a 255 por tanto el 58% del escalón se corresponde con 148 dentro del rango. De esta forma la ganancia del proceso K es:

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{-5}{148} = -0.0338$$

El tiempo en el que la respuesta alcanza el 63.2% del valor final corresponde a la constante de tiempo τ , teniendo -5 como valor final se tiene que:

$$V_{\tau} = \frac{5 * 63.2}{100} = 3.16$$

Donde V_{τ} es el valor que se alcanza en el tiempo τ . En la Figura 6-2, se identifica el tiempo en el cual se alcanza dicho valor.

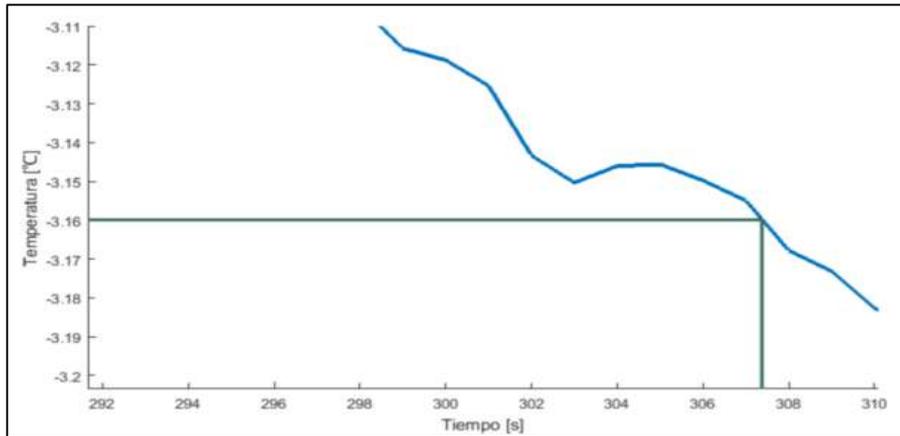


Figura 6-2: Identificación de la constante de tiempo τ

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

$$T_{\tau} \approx 307 \text{ s}$$

Obtenidos los valores de K y τ se puede expresar la función de transferencia del sistema como:

$$G(S) = \frac{-0.0338}{307S + 1}$$

Se realiza la simulación a través de Matlab de la respuesta de la función de transferencia obtenida ante una entrada tipo escalón de igual magnitud a la introducida en el sistema real. Se observa su comportamiento en la Figura 7-2, junto la respuesta real.

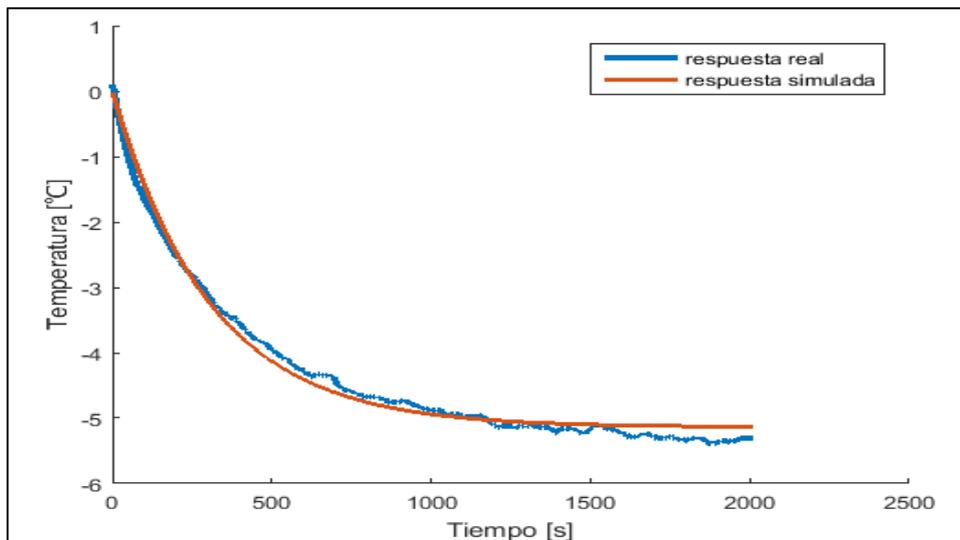


Figura 7-2: Respuesta real y simulada del sistema bajo el modelo calculado.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Además de la función de transferencia obtenida se utiliza la herramienta PID Tuner de Matlab para identificar el modelo que identifica como apropiado para representar el comportamiento del mismo sistema y compararlos. En la figura 8-2, se observa los valores de las constantes dadas por el programa.

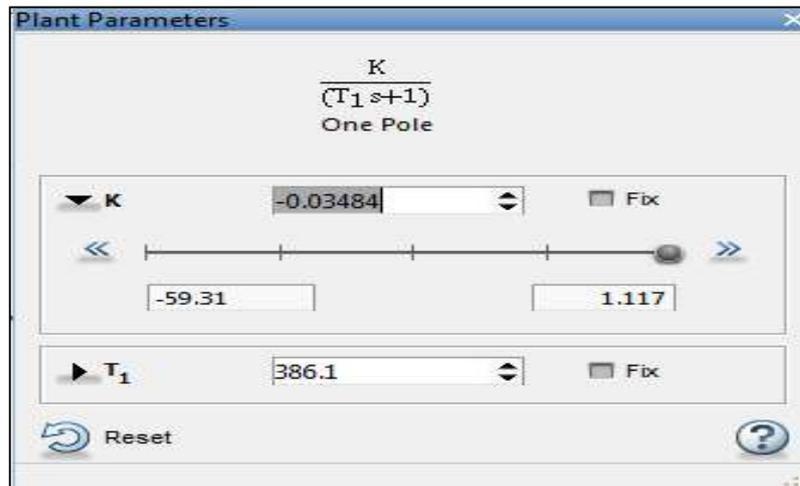


Figura 8-2: Constantes obtenidas con el PID Tuner de Matlab.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

$$K = -0.03484$$

$$T_{\tau} = 386 \text{ s}$$

En la Figura 9-2, se observa la curva de respuesta simulada del modelo con las constantes dadas por Matlab.

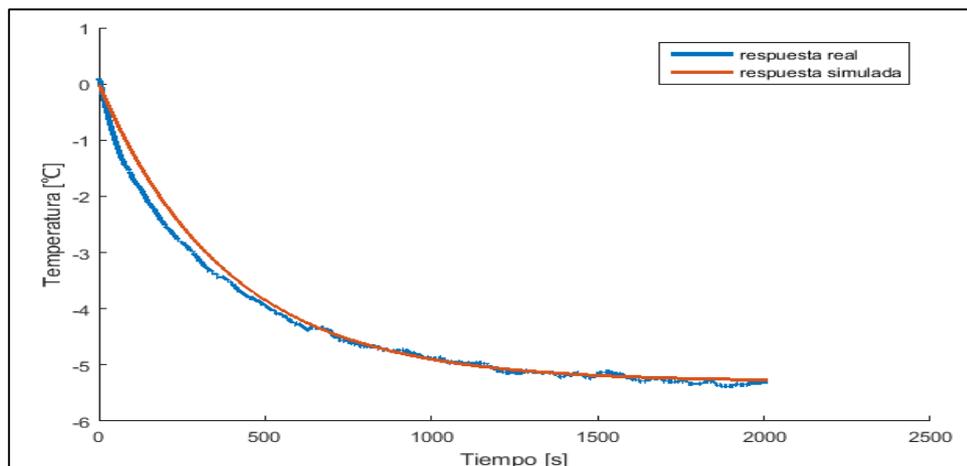


Figura 9-2: Respuesta real y simulada del sistema bajo el modelo de Matlab.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Para la evaluación de los modelos matemáticos se utiliza el indicador RMSE (Raíz del Error Cuadrático Medio) y se calcula con la ecuación 2:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (A_i - F_i)^2}$$

Mediante la cual se establece el valor RMSE para el modelo calculado igual a 0.1922 y para el modelo dado por Matlab en 0.1569. Dado que los dos valores de RMSE son bajos se puede determinar que uno y otro presentan una respuesta confiable para representar el sistema. Sin embargo se adopta el segundo como función de transferencia del sistema por presentar un menor valor en el RMSE. El modelo matemático para representar el comportamiento del sistema que da como:

$$G(s) = \frac{-0.03484}{386s + 1}$$

2.5.1.4 Termocupla tipo K

El sensor de temperatura utilizado en el sistema es la termocupla tipo k acoplada a la tarjeta MAX6675 como convertidor analógico digital. Para obtener el modelo matemático del sensor se relaciona el valor real de la magnitud medida con el valor medido por el sensor en estado estacionario y transitorio. El sensor tiene un tiempo de conversión entre 0.17 y 0.22 s, por lo tanto se establece 0.2 s como tiempo de muestreo. Se utiliza un termómetro analógico como instrumento de medida para establecer el valor de la señal tipo escalón.

Se introduce la termocupla en agua a temperatura ambiente a 17.75°C, seguidamente se somete el sensor en otra fuente con agua a una temperatura mayor conocida a través del termómetro analógico, se toman los datos de la variación de temperatura en el tiempo, hasta su estabilización al nuevo valor. Se realiza el proceso con entradas tipo escalón a temperaturas de 21, 24 y 26°C.

A través del puerto serial, del microcontrolador Arduino, se realiza la recolección de datos. Seguidamente se los almacena en una tabla donde están clasificados de acuerdo a las señales de entrada escalón. De la tabla de datos estos se ingresan al software matemático Matlab y se obtienen las gráficas de comportamiento en el tiempo de la termocupla mostradas en la Figura 10-2., de las cuales se establece el comportamiento del sensor como un sistema de primer orden, correspondiente a la función de transferencia:

$$H(S) = \frac{K}{\tau S + 1}$$

Donde K corresponde a la ganancia del proceso y τ es la constante de tiempo del sistema.

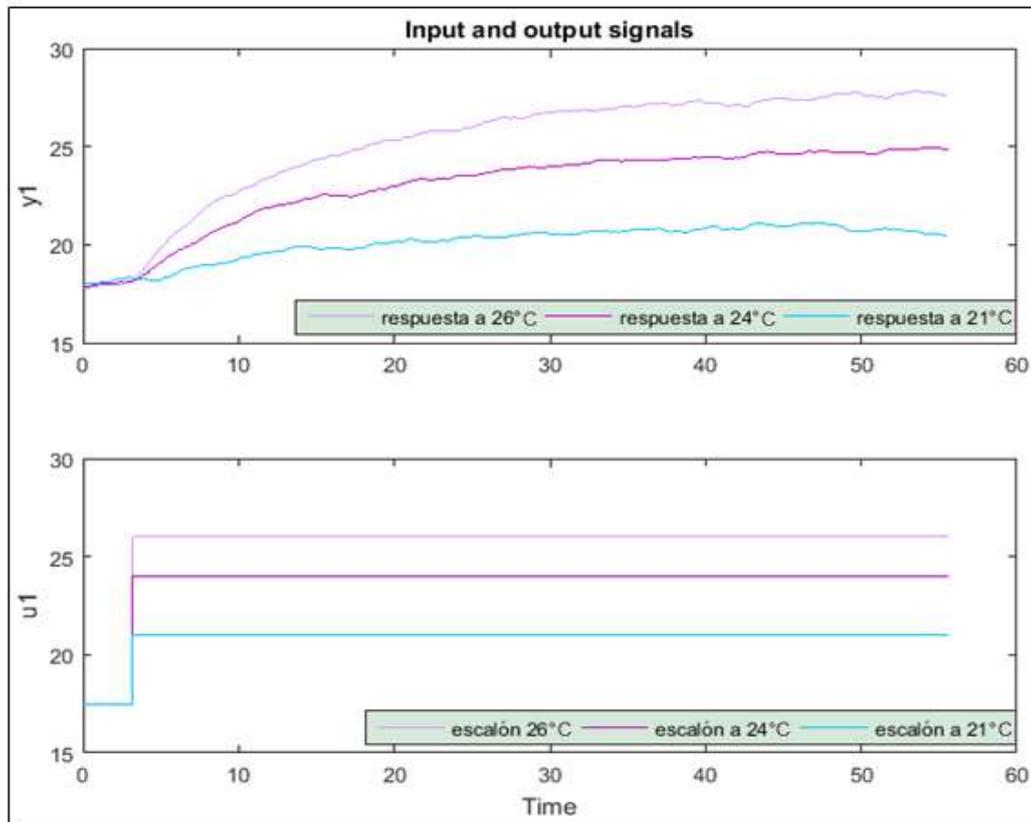


Figura 10-2: Curvas de respuesta de la termocupla tipo k frente a entradas tipo escalón.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

De la curva de respuesta al escalón de 21°C el valor final se estabiliza a los 20.75°C, por lo tanto la ganancia K se calcula:

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{20.75}{21} = 0.99$$

La constante de tiempo τ , es el tiempo donde la señal de temperatura alcanza el 63.2% del valor final. Para su identificación se establece:

$$R = 20.75 - 17.75 = 3$$

$$V_{\tau} = 17.75 + \frac{3 * 63.2}{100} = 19.65$$

$$T_{\tau} \approx 11.6 \text{ s}$$

Donde R es el recorrido de la temperatura de respuesta, V_{τ} el valor alcanzado en τ y T_{τ} el tiempo desde el origen hasta τ . Todas las curvas de respuesta tienen un tiempo de 4 s en estado estable antes de la señal escalón, por tanto se resta este tiempo para hallar la constante de tiempo τ .

$$\tau = 11.6 \text{ s} - 4 \text{ s} = 7.6 \text{ s}$$

Así mismo se obtiene el valor de las constantes K y τ para las entradas escalón de 24 y 26°C.

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{24.75}{24} = 1.03$$

$$R = 24.75 - 17.75 = 7$$

$$V_{\tau} = 17.75 + \frac{6.75 * 63.2}{100} = 22.17$$

$$T_{\tau} \approx 12 \text{ s}$$

$$\tau = 12 \text{ s} - 4 \text{ s} = 8 \text{ s}$$

$$K = \frac{V_{out}}{V_{in}} = \frac{27.25}{26} = 1.05$$

$$R = 27.25 - 17.75 = 9.5$$

$$V_{\tau} = 17.75 + \frac{9.5 * 63.2}{100} = 23.75$$

$$T_{\tau} \approx 12.5 \text{ s}$$

$$\tau = 12.5 \text{ s} - 4 \text{ s} = 8.5 \text{ s}$$

En la Tabla 3-2 se resume los valores de K y τ para cada señal de entrada.

Tabla 3-2: Constantes K y τ .

Entrada escalón	Ganancia K	Constante de tiempo τ
21°C	0.99	7.6
24°C	1.03	8
26°C	1.05	8.5

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se calcula la media de las constantes obtenidas, siendo $K = 1.02$ y $\tau = 8.03$, reemplazados en la función de transferencia de primer orden se tiene:

$$H(S) = \frac{1.02}{8.03 S + 1}$$

Se realiza la simulación del comportamiento del sensor con la función de transferencia obtenida aplicando entradas de la misma magnitud. En la figura 11-2, se muestra la curva media de las respuestas simuladas y reales.

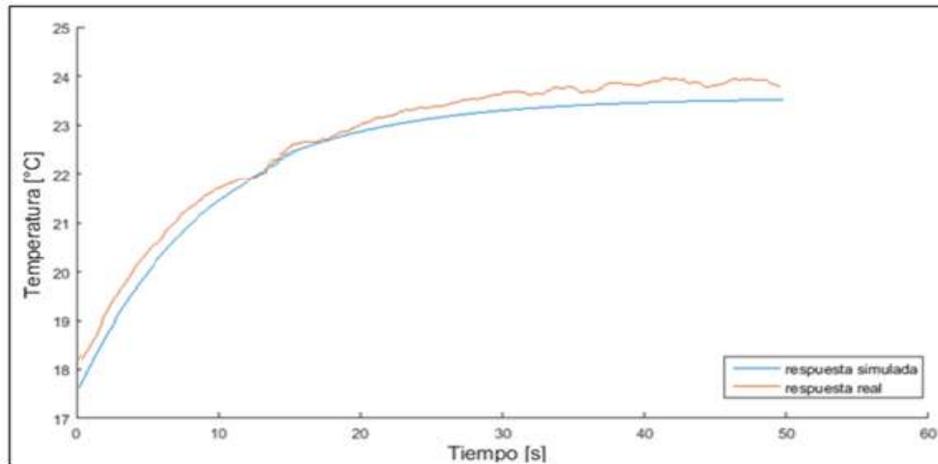


Figura 11-2: Respuesta media simulada y real

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

De las curvas se calcula el indicador $RMSE = 0,34667161$ con la ecuación 2, mostrando confiabilidad en el modelo. La ganancia promedio 1.02 del sensor sobre la temperatura medida indica una precisión confiable de los valores dados por el sensor. El valor de la constante de tiempo $\tau = 8.03s$ indica un bajo valor frente a la constante de tiempo del sistema de 307s ante una entrada escalón, al ser un sistema con una dinámica lenta no se ve afectado por el tiempo de respuesta del sensor, por tanto se asigna al comportamiento del sensor una ganancia unitaria.

2.5.2 Control clásico proporcional integral (PI)

Para el control de temperatura del sistema de enfriamiento se desarrolla un control clásico proporcional integral (PI), este tipo de controlador se caracteriza por eliminar el error en régimen estacionario. De acuerdo con Villalba (2017, p. 24), la función de transferencia para el controlador PI se expresa como:

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

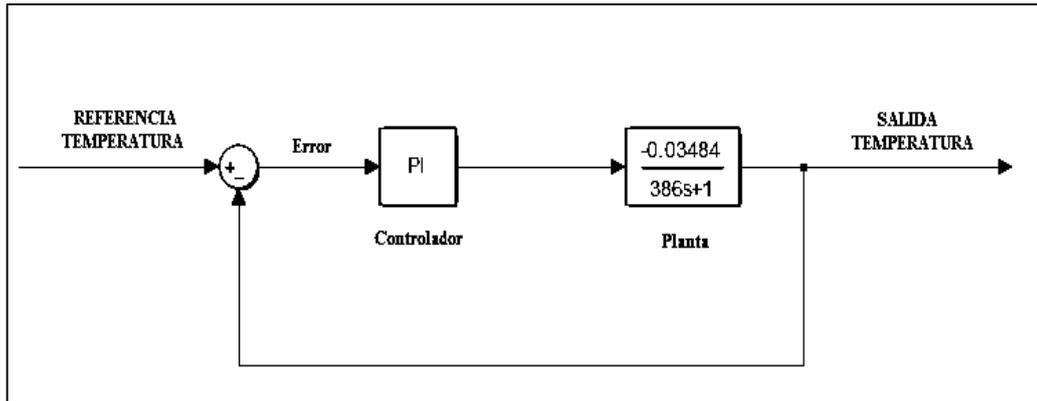


Figura 12-2: Diagrama de bloques del sistema de enfriamiento con un controlador PI.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

En la Figura 12-2, se muestra el diagrama de bloques del sistema de enfriamiento con un controlador PI. Para establecer los parámetros de ganancia proporcional K_p e integral K_i del controlador se aplica el método de la curva de Zingler&Nichols. Para aplicar esta técnica se introduce una señal escalón a la planta en lazo abierto una vez que el sistema ha entrado en estado estable. Se recolecta los datos de respuesta de temperatura ante la entrada como se realizó en la etapa de identificación del comportamiento de la planta. Una vez registrados los datos por un microcontrolador estos se ingresan a la herramienta software Matlab para su análisis.

En Matlab se realiza un script para aplicar el método de la curva de Zingler&Nichols y obtener las constantes K_p y T_i del controlador PI. El código utilizado se muestra a continuación:

```
t=1:1:2012;
dt=1;
d=diff(temperatura)/dt;
[m,p]=min(d)
yi=temperatura(p);
ti=t(p);
L=ti-yi/m;
Tau=(temperatura(end)-yi)/m+ti-L
kp=0.9*Tau/L
ti=L/0.3
Kp =
```

- 23.0231

Ti =

36.0724

Siendo $K_i = \frac{K_p}{T_i}$ se tiene $K_p = -23.0231$ y $K_i = -0.64$. A través de Simulink se realiza la simulación del sistema con el control PI con las constantes de ganancia K_p y K_i obtenidas como se observa en la Figura 13-2.

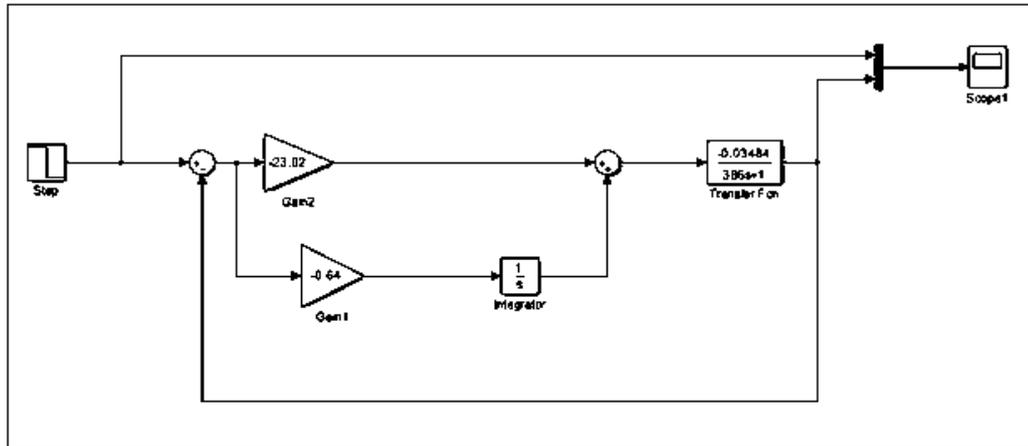


Figura 13-2: Simulación del controlador clásico PI

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

En la figura 14-2, se observa la respuesta del sistema bajo el controlador PI simulado. Se observa que la respuesta antes de su estabilización presenta un sobrepaso.

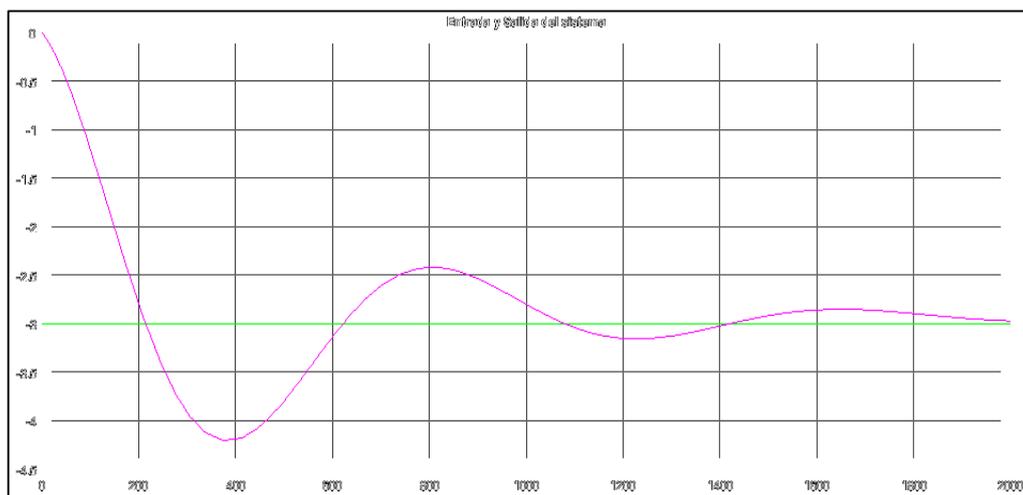


Figura 14-2: Respuesta simulada del controlador clásico PI

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

2.5.3 Controlador basado en lógica difusa

Para el diseño del control de temperatura aplicando lógica difusa se establece como entradas el error (E) y a la derivada del error (dE). Además, se considera como salida una señal PWM, la misma que ingresa como señal de control al driver del motor del ventilador de la planta. De acuerdo a la velocidad de giro del ventilador, la temperatura del refrigerante va variando. A través del sensor se mide la temperatura para compararla con la establecida como referencia. De la comparación se obtiene el nuevo error (E) y derivada del error (dE) que ingresan al controlador para obtener nuevamente la señal de control que corrija el error en el sistema. Este proceso de control está representado por el diagrama de bloques presentado en la Figura 15-2.

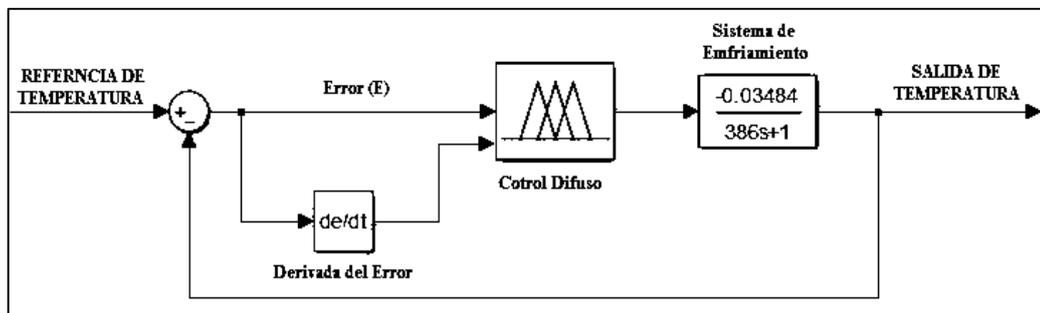


Figura 15-2: Diagrama de bloques del sistema de enfriamiento con un controlador difuso.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

El error (E) y la derivada del error (dE) toman el nombre de universos del discurso de entrada del proceso difuso. Estos son divididos en subconjuntos difusos a los cuales se les asigna una etiqueta lingüística que los identifique y una función de pertenencia. El universo del discurso del error es particionado en 5 subconjuntos con funciones de pertenencia del tipo triangular y trapezoidal como se muestra en la Figura 16-2.

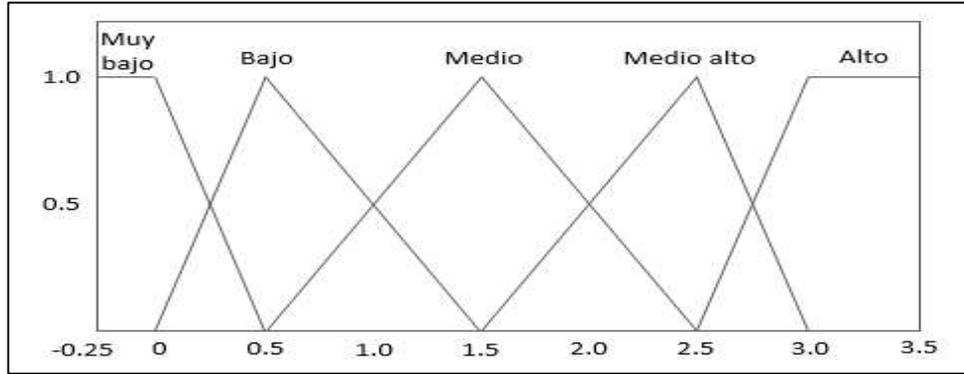


Figura 16-2: Universo del discurso del error

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La etiqueta lingüística de cada subconjunto difuso se abreviará en adelante como se muestra a continuación en la Tabla 4-2:

Tabla 4-2: Variables lingüísticas del error.

Etiqueta Lingüística	Abreviatura	Rango
Muy bajo	MB	[-0.25, 0.5]
Bajo	B	[0, 1.5]
Medio	M	[0.5, 2.5]
Medio Alto	MA	[1.5, 3]
Alto	A	[2.5, 3.5]

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La función de pertenencia de cada subconjunto permite conocer el grado de pertenencia que tiene un elemento del conjunto de valores del error al respectivo subconjunto:

- Subconjunto MB

Función Trapezoidal

$$\mu_{MB} = \begin{cases} 1 & \text{si } -0.25 \leq E \leq 0 \\ \frac{0.5 - E}{0.5 - 0} & \text{si } 0 < E \leq 0.5 \\ 0 & \text{si } E > 0.5 \end{cases}$$

- Subconjunto B

Función Triangular

$$\mu_B = \begin{bmatrix} 0 & \text{si } E \leq 0 \\ \frac{E - 0}{0.5 - 0} & \text{si } 0 < E \leq 0.5 \\ \frac{1.5 - E}{1.5 - 0.5} & \text{si } 0.5 < E \leq 1.5 \\ 0 & \text{si } E > 1.5 \end{bmatrix}$$

- Subconjunto M

Función Triangular

$$\mu_M = \begin{bmatrix} 0 & \text{si } E \leq 0.5 \\ \frac{E - 0.5}{1.5 - 0.5} & \text{si } 0.5 < E \leq 1.5 \\ \frac{2.5 - E}{2.5 - 1.5} & \text{si } 1.5 < E \leq 2.5 \\ 0 & \text{si } E > 2.5 \end{bmatrix}$$

- Subconjunto MA

Función Triangular

$$\mu_{MA} = \begin{bmatrix} 0 & \text{si } E \leq 1.5 \\ \frac{E - 1.5}{2.5 - 1.5} & \text{si } 1.5 < E \leq 2.5 \\ \frac{3 - E}{3 - 2.5} & \text{si } 2.5 < E \leq 3 \\ 0 & \text{si } E > 3 \end{bmatrix}$$

- Subconjunto A

Función Trapezoidal

$$\mu_A = \begin{bmatrix} 0 & \text{si } E \leq 2.5 \\ \frac{E - 2.5}{3 - 2.5} & \text{si } 2.5 < E \leq 3 \\ 1 & \text{si } 3 < E \leq 3.5 \end{bmatrix}$$

Por otro lado, la derivada del error se divide en 3 sub conjuntos difusos con funciones de pertenencia de forma triangular y trapezoidal como se muestra en la Figura 17-2

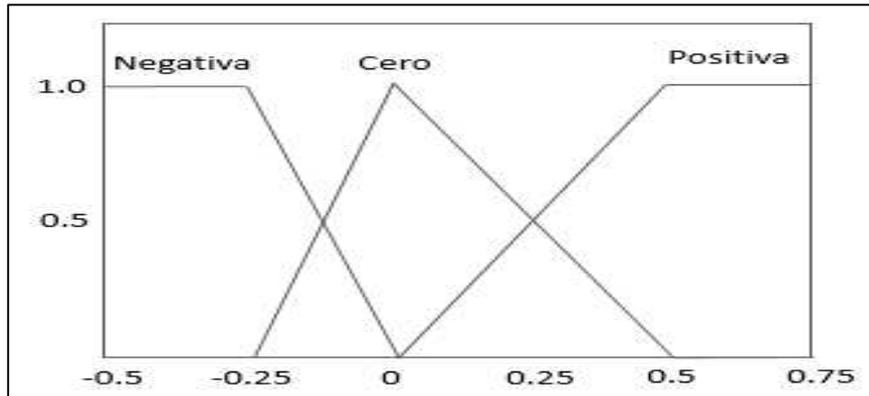


Figura 17-2: Universo del discurso de la derivada del Error

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La etiqueta lingüística de cada subconjunto se abreviará en adelante como se muestra a continuación en la Tabla 5-2:

Tabla 5-2: Variables lingüísticas de la derivada del error.

Etiqueta Lingüística	Abreviatura	Rango
Negativo	N	[-0.5, 0]
Cero	C	[-0.25, 0.5]
Positivo	P	[0, 0.75]

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La función de pertenencia de cada subconjunto de la derivada de error permite conocer el grado de pertenencia de un elemento al respectivo subconjunto:

- Subconjunto N

Función Trapezoidal

$$\mu_N = \begin{cases} 1 & \text{si } -0.5 \leq dE \leq -0.25 \\ \frac{0 - dE}{0 - (-0.25)} & \text{si } -0.25 < dE \leq 0 \\ 0 & \text{si } dE > 0 \end{cases}$$

- Subconjunto C

Función Triangular

$$\mu_C = \begin{cases} 0 & \text{si } dE \leq -0.25 \\ \frac{dE - (-0.25)}{0 - (-0.25)} & \text{si } -0.25 < dE \leq 0 \\ \frac{0.5 - dE}{0.5 - 0} & \text{si } 0 < dE \leq 0.5 \\ 0 & \text{si } dE > 0.5 \end{cases}$$

- Subconjunto P

Función Trapezoidal

$$\mu_P = \begin{cases} 0 & \text{si } dE \leq 0 \\ \frac{dE - 0}{0.5 - 0} & \text{si } 0 < dE \leq 0.5 \\ 1 & \text{si } 0.5 < dE \leq 0.75 \end{cases}$$

Un sistema de control aplicando lógica difusa está compuesto por 3 etapas: Fusificación, Inferencia y Defusificación. Dentro de la etapa de inferencia los modelos aplicados más conocidos son el de Mamdani y TSK. Se aplicará los dos tipos de inferencia para su comparación.

2.5.3.1 Fusificación

Se calcula el grado de pertenencia a los subconjuntos difusos del valor del error y la derivada del error. Tomando como ejemplo $e = 1.25$ y $dE = 0.3$ para su fusificación se determina los subconjuntos difusos de los cuales forman parte. Se identifica que el error pertenece a las funciones de pertenencia Bajo y Medio del universo del discurso del error.

Tabla 6-2: Subconjuntos activados del error

Bajo	B	[0, 1.5]
Medio	M	[0.5, 2.5]

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Mientras la derivada del error está dentro del rango de las funciones de pertenencia Cero y Positivo del universo del discurso de la derivada del error.

Tabla 7-2: Subconjuntos activados de la derivada del error.

Cero	C	[-0.25, 0.5]
Positivo	P	[0, 0.75]

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Posteriormente, se calcula el grado de verdad de las funciones de pertenecía activadas, que para el caso del ejemplo se obtiene:

Bajo

$$\mu_B = \frac{1.5 - 1.25}{1.5 - 0.5} = 0.25$$

Medio

$$\mu_M = \frac{1.25 - 0.5}{1.5 - 0.5} = 0.75$$

Cero

$$\mu_C = \frac{0.5 - 0.3}{0.5 - 0} = 0.4$$

Positivo

$$\mu_P = \frac{0.3 - 0}{0.5 - 0} = 0.6$$

2.5.3.2 Inferencia

2.5.3.2.1 Metodo de Mamdani

Para la aplicación de este metodo se establece se establece como universo del discurso de salida al porcentaje del ciclo de trabajo de la señal PWM (%PWM) para activar el ventilador del sistema de enfriamiento. El universo del discurso de los valores del porcentaje de ciclo de trabajo se divide en 5 subconjuntos con funciones de pertenencia tipo triangular como se muestra en la Figura 18-2.

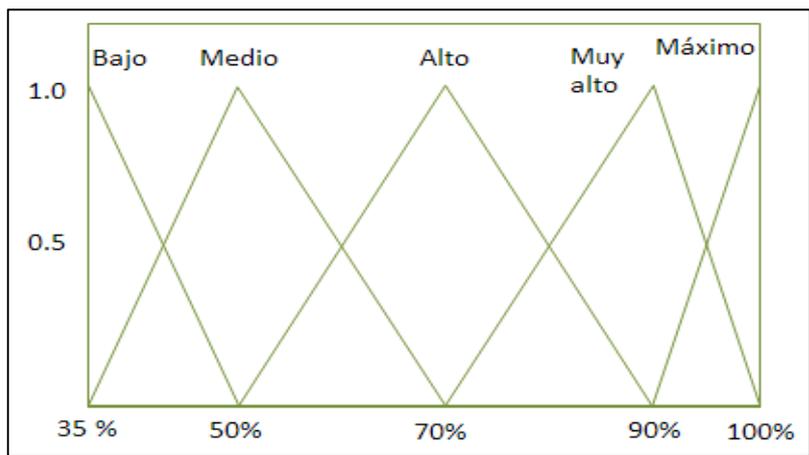


Figura 18-2: Universo del discurso del PWM.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La etiqueta lingüística de cada subconjunto difuso se abreviará en adelante como se muestra a continuación en la Tabla 8-2.

Tabla 8-2: Variables lingüísticas del subconjunto del PWM.

Etiqueta Lingüística	Abreviatura	Rango
Bajo	%B	[35%, 50%]
Medio	%M	[35%, 70%]
Alto	%A	[50%, 90%]
Muy alto	%MA	[70%, 100%]
Máximo	%MX	[90%, 100%]

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La función de pertenencia de cada subconjunto del porcentaje del ciclo de trabajo del PWM permite conocer el grado de pertenencia de un elemento al subconjunto:

- Subconjunto %B

Función Triangular

$$\mu_{\%B} = \left[\begin{array}{ll} 0 & \text{si } PWM < 35 \\ \frac{50 - PWM}{50 - 35} & \text{si } 35 \leq PWM \leq 50 \\ 0 & \text{si } PWM > 50 \end{array} \right]$$

- Subconjunto %M

Función Triangular

$$\mu_{\%M} = \left[\begin{array}{ll} 0 & \text{si } PWM \leq 35 \\ \frac{PWM - 35}{50 - 35} & \text{si } 35 < PWM \leq 50 \\ \frac{70 - PWM}{70 - 50} & \text{si } 50 < PWM \leq 70 \\ 0 & \text{si } PWM > 70 \end{array} \right]$$

- Subconjunto %A

Función Triangular

$$\mu_{\%A} = \left[\begin{array}{ll} 0 & \text{si } PWM < 50 \\ \frac{PWM - 50}{70 - 50} & \text{si } 50 < PWM \leq 70 \\ \frac{90 - PWM}{90 - 70} & \text{si } 70 < PWM \leq 90 \\ 0 & \text{si } PWM > 90 \end{array} \right]$$

- Subconjunto MA

Función Triangular

$$\mu_{\%MA} = \left[\begin{array}{ll} 0 & \text{si } PWM \leq 70 \\ \frac{PWM - 70}{90 - 70} & \text{si } 70 < PWM \leq 90 \\ \frac{100 - PWM}{100 - 90} & \text{si } 90 < PWM \leq 100 \\ 0 & \text{si } E > 100 \end{array} \right]$$

- Subconjunto MX

Función Triangular

$$\mu_{\%MX} = \left[\begin{array}{ll} 0 & \text{si } PWM < 90 \\ \frac{PWM - 90}{100 - 90} & \text{si } 90 < PWM \leq 100 \\ 0 & \text{si } PWM > 100 \end{array} \right]$$

Se establecen 15 reglas como la base del conocimiento, donde el antecedente está formado por los subconjuntos difusos del error y la derivada del error y el consecuente por los subconjuntos difusos del porcentaje del ciclo de trabajo de la señal PWM.

Tabla 9-2: Base de reglas definidas para la inferencia Mamdani.

Número de regla	SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	ENTONCES el porcentaje del ciclo de trabajo del PWM (%PWM) es
1	MB	N	%B
2	MB	C	%B
3	MB	P	%M
4	B	N	%M
5	B	C	%M
6	B	P	%A
7	M	N	%A
8	M	C	%A
9	M	P	%MA
10	MA	N	%MA
11	MA	C	%MA
12	MA	P	%MX
13	A	N	%MX
14	A	C	%MX
15	A	P	%MX

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

De las reglas establecidas se identifica 4 reglas activas donde cada antecedente tiene su grado pertenencia $\mu_B = 0.25$ $\mu_M = 0.75$ $\mu_C = 0.4$ y $\mu_P = 0.6$ determinado en la etapa de fusificación.

Tabla 10-2: Reglas activadas.

		Derivada del error dE		
		N	C	P
Error	MB	1 %B	2 %B	3 %M
	B	4 %M	5 %M	6 %A
	M	7 %A	8 %A	9 %MA
	MA	10 %MA	11 %MA	12 %MX
	A	13 %MX	14 %MX	15 %MX

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se realiza la operación de mínimos para definir un grado de pertenencia por cada regla activada. Siguiendo el ejemplo anterior, se desarrollan los casos para las **Reglas 5, 6, 8 y 9** de la Tabla 9-2:

Regla 5

$$\mu_{\%M} = \min(\mu_B, \mu_C)$$

$$\mu_{\%M} = \min(0.25, 0.4)$$

$$\mu_{\%M} = 0.25$$

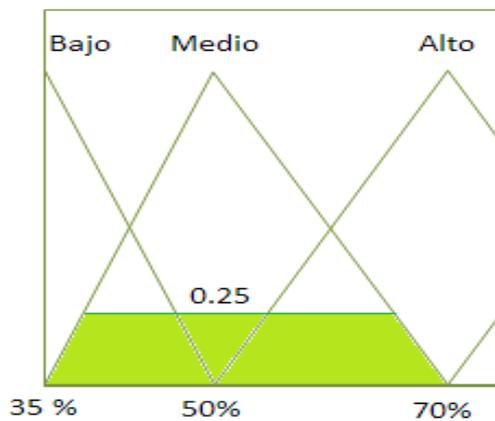


Figura 19-2: Grado de pertenencia regla 5.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Regla 6

$$\mu_{\%A} = \min(\mu_B, \mu_P)$$

$$\mu_{\%A} = \min(0.25, 0.6)$$

$$\mu_{\%A} = 0.25$$

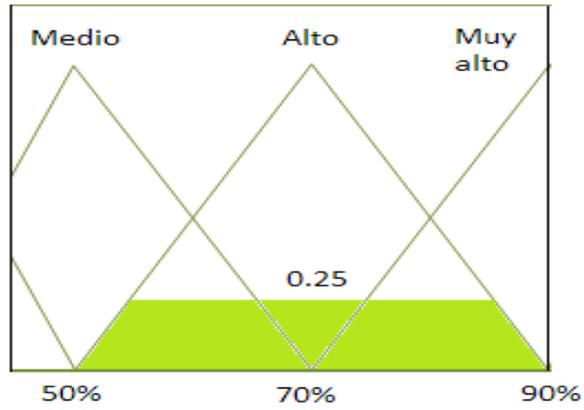


Figura 20-2: Grado de pertenencia regla 6.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Regla 8

$$\mu_{\%A} = \min(\mu_M, \mu_C)$$

$$\mu_{\%A} = \min(0.75, 0.4)$$

$$\mu_{\%A} = 0.4$$

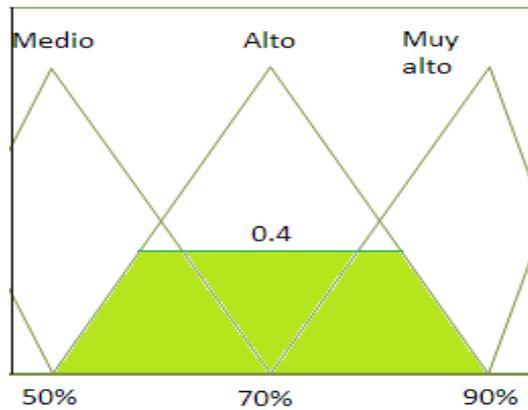


Figura 21-2: Grado de pertenencia regla 8.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Regla 9

$$\mu_{\%MA} = \min(\mu_M, \mu_P)$$

$$\mu_{\%MA} = \min(0.75, 0.6)$$

$$\mu_{\%MA} = 0.6$$

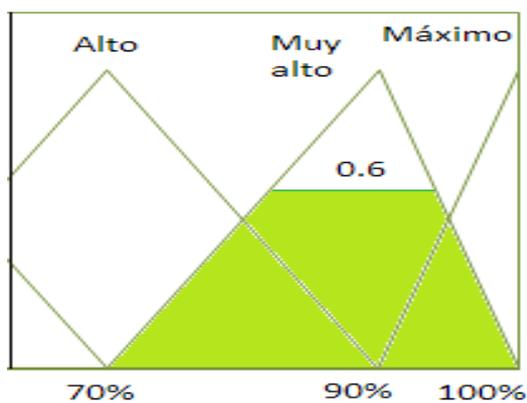


Figura 22-2: Grado de pertenencia regla 9.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Finalmente, se realiza la agregación de los consecuentes obtenidos de la aplicación de las reglas de inferencia que fueron desarrolladas. La agregación obtenida visualizada en la Figura 23-2.

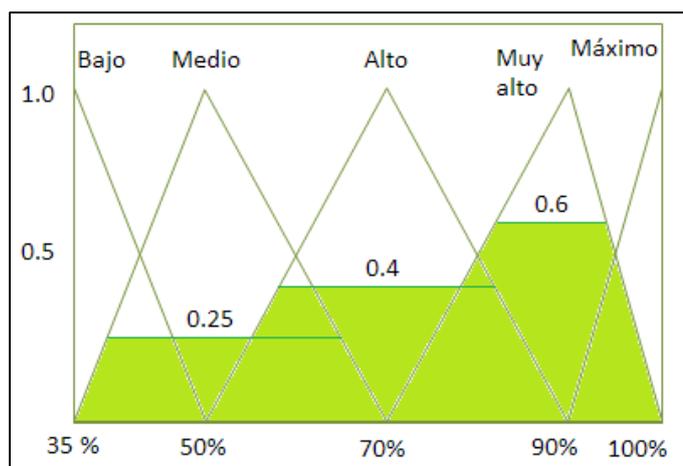


Figura 23-2: Agregación de los consecuentes.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

2.5.3.2.2 Método Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

En este método, en lugar de obtener un conjunto difuso en el consecuente como en el método de Mamdani, se obtiene una función a través de la cual se obtiene valores de consecuentes constantes. En el caso de este estudio se han utilizado funciones consecuentes llamadas singletons. La base de reglas que han sido definidas para la inferencia difusa tipo TSK se resume en la Tabla 11-2.

Tabla 11-2: Base de reglas definidas para la inferencia TSK.

Número de regla	SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	ENTONCES el porcentaje del ciclo de trabajo del PWM (%PWM) es
1	MB	N	$C_1 = 35$
2	MB	C	$C_2 = 37$
3	MB	P	$C_3 = 50$
4	B	N	$C_4 = 52$
5	B	C	$C_5 = 54$
6	B	P	$C_6 = 70$
7	M	N	$C_7 = 72$
8	M	C	$C_8 = 74$
9	M	P	$C_9 = 90$
10	MA	N	$C_{10} = 92$
11	MA	C	$C_{11} = 94$
12	MA	P	$C_{12} = 100$
13	A	N	$C_{13} = 100$
14	A	C	$C_{14} = 100$
15	A	C	$C_{15} = 100$

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Siguiendo el mismo ejemplo explicativo utilizado en el apartado anterior, los valores de grado de pertenencia que se obtuvieron durante la fusificación fueron $\mu_B = 0.25$ $\mu_M = 0.75$ $\mu_C = 0.4$ y $\mu_P = 0.6$ correspondientes a los subconjuntos difusos activados por las entradas. Estos subconjuntos forman parte de los consecuentes de las 4 reglas de la base del conocimiento, como se muestra en la Tabla 12-2.

Tabla 12-2: Reglas de conocimiento.

		Derivada del error dE		
		N	C	P
Error	MB	1) 35	2) 37	3) 50
	B	4) 52	5) 54	6) 70
	M	7) 72	8) 74	9) 90
	MA	10) 92	11) 94	12) 100
	A	13) 100	14) 100	15) 100

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se realiza la operación de mínimos para definir un grado de verdad por cada regla activada de la siguiente manera:

Regla 5

$$\mu_5 = \min(\mu_B, \mu_C)$$

$$\mu_5 = \min(0.25, 0.4)$$

$$\mu_5 = 0.25$$

Regla 6

$$\mu_6 = \min(\mu_B, \mu_P)$$

$$\mu_6 = \min(0.25, 0.6)$$

$$\mu_6 = 0.25$$

Regla 8

$$\mu_8 = \min(\mu_M, \mu_C)$$

$$\mu_8 = \min(0.75, 0.4)$$

$$\mu_8 = 0.4$$

Regla 9

$$\mu_9 = \min(\mu_M, \mu_P)$$

$$\mu_9 = \min(0.75, 0.6)$$

$$\mu_9 = 0.6$$

2.5.3.3 Defusificación

2.5.3.3.1 Método de Mamdani

Para la defusificación se aplica el método del centroide para hallar la coordenada x del centro del área de la gráfica consecuyente. El conjunto difuso agregado puede ser dividido en varias figuras geométricas como triángulos, rectángulos, romboides y trapecios de los cuales se puede calcular el área y centro de gravedad.

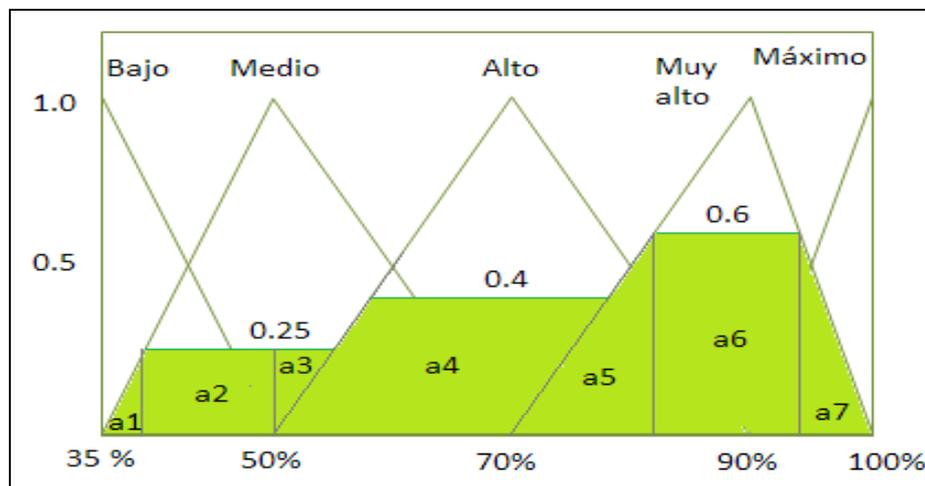


Figura 24-2: División por áreas del consecuyente agregado.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

La Figura 24-2 se ha dividido en 7 áreas la primera corresponde a un triángulo rectángulo, la segunda es un rectángulo, la tercera es un triángulo rectángulo invertido, la cuarta es un romboide que tiene sus ángulos iguales dos a dos, la quinta es un triángulo rectángulo, la sexta un rectángulo y la séptima un triángulo rectángulo. Se calcula las áreas de cada y su centro de gravedad en el eje x para ello se identifica el valor de algunos puntos en el eje x (PWM1, PWM2, PWM3, PWM4) que permitan definir las figuras geométricas básicas.

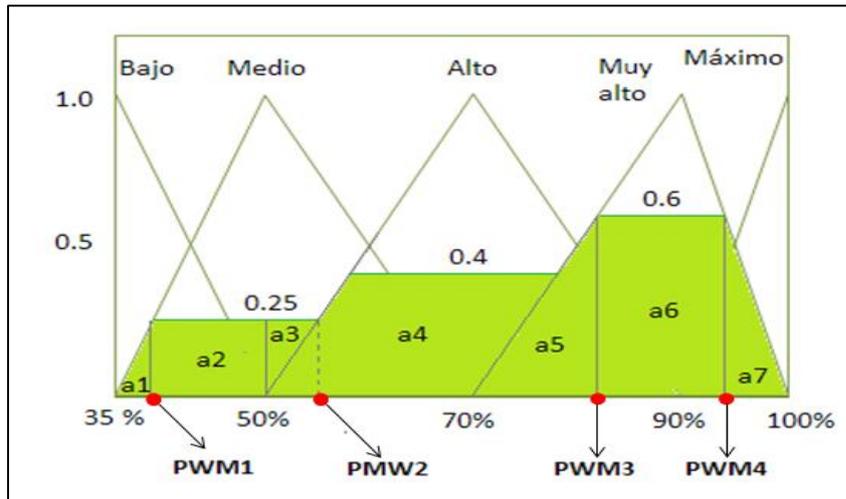


Figura 25-2: Establecimiento de puntos en el consecuente agregado.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

$$PWM1 = 35 + \mu_{\%M} * (50 - 35)$$

$$PWM1 = 35 + 0.25 * (50 - 35)$$

$$PWM1 = 38.75$$

$$PWM2 = 50 + \mu_{\%M} * (70 - 50)$$

$$PWM2 = 50 + 0.25 * (70 - 50)$$

$$PWM2 = 55$$

$$PWM3 = 70 + \mu_{\%MA} * (90 - 70)$$

$$PWM3 = 70 + 0.6 * (90 - 70)$$

$$PWM3 = 82$$

$$PWM4 = 100 - \mu_{\%MA} * (100 - 90)$$

$$PWM4 = 100 - 0.6 * (100 - 90)$$

$$PWM4 = 94$$

Área 1

$$a1 = \frac{(PWM1 - 35) * 0.25}{2}$$

$$a1 = 0.469$$

Centro 1

$$c1 = PWM1 - \frac{(PWM1 - 35)}{3}$$

$$c1 = 37.5$$

Área 2

$$a2 = (50 - PWM1) * 0.25$$

$$a2 = 2.813$$

Centro 2

$$c2 = PWM1 + \frac{(50 - PWM1)}{2}$$

$$c2 = 44.375$$

Área 3

$$a3 = \frac{(PWM2 - 50) * 0.25}{2}$$

$$a3 = 0.625$$

Centro 3

$$c3 = 50 + \frac{(PWM2 - 50)}{3}$$

$$c3 = 51.667$$

Área 4

$$a4 = (70 - 50) * 0.4$$

$$a4 = 8$$

Centro 4

$$c4 = 50 + \frac{(70 - 50)}{2}$$

$$c4 = 60$$

Área 5

$$a5 = \frac{(PWM3 - 70) * 0.6}{2}$$

$$a5 = 3.6$$

Centro 5

$$c5 = PWM3 - \frac{(PWM3 - 70)}{3}$$

$$c5 = 78$$

Área 6

$$a6 = (PWM4 - PWM3) * 0.6$$

$$a6 = 7.2$$

Centro 6

$$c6 = PWM3 + \frac{PWM4 - PWM3}{2}$$

$$c6 = 88$$

Área 7

$$a7 = \frac{(100 - PWM4) * 0.6}{2}$$

$$a7 = 1.8$$

Centro 7

$$c7 = PWM4 + \frac{(100 - PWM4)}{3}$$

$$c7 = 96$$

Para hallar la coordenada x del centroide de la figura completa se aplica:

$$Centroidex = \frac{a1 * c1 + a2 * c2 + a3 * c3 + a4 * c4 + a5 * c5 + a6 * c6}{a1 + a2 + a3 + a4 + a5 + a6}$$

La coordenada hallada corresponde a la salida del sistema difuso es decir al porcentaje del ciclo de trabajo de la señal de control PWM de la ecuación 1:

$$\%PWM = \frac{0.469*37.5+2.813*44.375+0.625*51.667+8*60+3.6*78+7.2*88+1.8*96}{0.469+2.813+0.625+8+3.6+7.2+1.8}$$

$$\%PWM = \frac{1741.906}{24.507}$$

$$\%PWM = 71.08$$

2.5.3.3.2 Método de Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

Para la defuzificación se realiza la división de la suma del producto del grado de pertenencia por la constante del consecuente de cada regla de la base del conocimiento, para la suma de los grados de pertenencia. El valor resultante corresponde al porcentaje del ciclo de trabajo de la señal PWM de control de la ecuación 1:

$$\%PWM = \frac{\mu_2 * \%PWM_2 + \mu_3 * \%PWM_3 + \mu_4 * \%PWM_4}{\mu_5 + \mu_6 + \mu_8 + \mu_9}$$

$$\%PWM = \frac{0.25 * 54 + 0.25 * 70 + 0.4 * 74 + 0.6 * 90}{0.25 + 0.25 + 0.4 + 0.6}$$

$$\%PWM = 76.4$$

2.5.4 Control PI con Ganancias variables aplicando Takagi-Sugeno-Kang

Para el diseño de un controlador PI con ganancias variables se establece los valores de las ganancias K_p y K_i para los cuales el sistema presenta estabilidad. Este análisis se realiza con la planta y el controlador PI clásico en lazo cerrado como se muestra en el diagrama de bloques de la Figura 26-2. Se emplean los valores de las ganancias K_p y K_i obtenidos anteriormente con la sintonización de Zingler&Nichols:

Dónde:

$$K_p = -23.0231$$

$$T_i = 36.0724$$

$$K_i = \frac{K_p}{T_i}$$

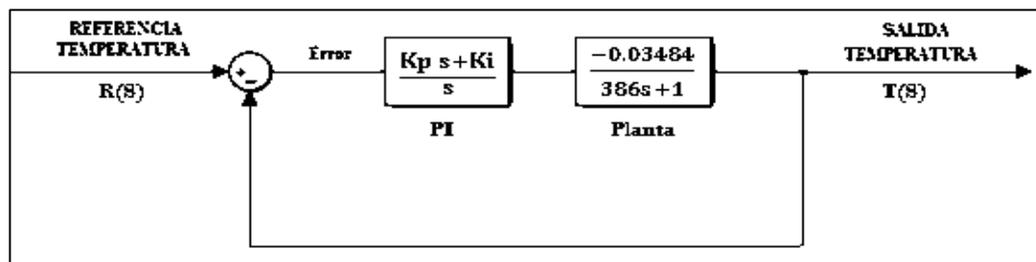


Figura 26-2: Diagrama de bloques del sistema con el controlador PI.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se obtiene la función de transferencia del sistema equivalente en lazo cerrado:

$$G(s) = \frac{\left(K_p + \frac{ki}{s}\right)\left(-\frac{0.03484}{386 \cdot s + 1}\right)}{1 + \left(K_p + \frac{ki}{s}\right)\left(-\frac{0.03484}{386 \cdot s + 1}\right)}$$

$$G(s) = \frac{\left(\frac{K_p s + ki}{s}\right)\left(-\frac{0.03484}{386s + 1}\right)}{1 + \left(\frac{K_p s + ki}{s}\right)\left(-\frac{0.03484}{386s + 1}\right)}$$

$$G(s) = \frac{(K_p s + ki)(-0.03484)}{s \cdot (386s + 1) + (K_p s + ki)(-0.03484)}$$

Se extrae la ecuación característica del sistema $G(s)$ para su análisis

$$EC(s) = 386s^2 + s - 0.03484 Kp s - 0.03484 ki$$

$$EC(s) = 386s^2 + s - 0.03484 Kp s - 0.03484 \frac{Kp}{Ti}$$

Remplazando $Ti=36.0724$

$$EC(s) = 386s^2 + s - 0.03484 Kp s - 0.03484 \frac{Kp}{36.0724}$$

$$EC(s) = 386s^2 + (1 - 0.03484Kp)s - 0.00097Kp$$

$$EC(s) = s^2 + \frac{(1 - 0.03484Kp)}{386} s - \frac{0.00097}{386} Kp$$

$$EC(s) = s^2 + \frac{(1 - 0.03484Kp)}{386} s - 2.513 * 10^{-6} Kp$$

La ecuación característica $EC(s)$ corresponde con la ecuación característica de un sistema de segundo orden representado por:

$$EC(s) = s^2 + 2 \xi \omega_n s + \omega_n^2$$

Para calcular las raíces de la ecuación se aplica la formula general:

$$-2 \xi \omega_n \pm \sqrt{(2 \xi \omega_n)^2 - 4\omega_n^2}$$

$$- \xi \omega_n \pm \sqrt{\xi^2 - 1}$$

Donde ω_n es la frecuencia natural del sistema y ξ es el coeficiente de amortiguamiento. Para obtener un sistema estable ω_n y ξ deben ser mayores a 0.

$$\omega_n^2 = -2.513 * 10^{-6} Kp$$

$$\omega_n = \sqrt{-2.513 * 10^{-6} Kp}$$

$$-2.513 * 10^{-6} Kp > 0$$

$$Kp < 0$$

Kp debe ser menor a cero para que ω_n sea mayor a cero, siendo así :

$$\omega_n = 1.583 * 10^{-3} \sqrt{Kp}$$

$$2 \xi \omega_n = \frac{1 - 0.03484 Kp}{386}$$

$$\xi = \frac{1 - 0.03484 Kp}{(386)2\omega_n}$$

$$\xi = \frac{1 - 0.03484 Kp}{(386)2(1.583 * 10^{-3} \sqrt{Kp})}$$

$$\xi = \frac{1 - 0.03484 Kp}{1.2221 \sqrt{Kp}}$$

$$\frac{1 - 0.03484 Kp}{1.2238 \sqrt{Kp}} > 0$$

$$1 - 0.03484 Kp > 0$$

$$-0.03484 Kp > -1$$

$$0.03484 Kp < 1$$

$$Kp < \frac{1}{0.03484}$$

$$Kp < 28.7026$$

Por lo tanto se establece que el sistema es estable para valores de Kp menores a 0 con Ti=36.0724

Para identificar los valores que puede tomar Ti en un sistema estable con Kp fijo se reemplaza la ecuación característica con Kp= -23.0231.

$$386 \cdot s^2 + s - 0.03484(-23.0231) \cdot s - 0.03484 \frac{(-23.0231)}{Ti}$$

$$386 \cdot s^2 + s + 0.8021s + \frac{0.8021}{Ti}$$

$$386 \cdot s^2 + 1.8021 \cdot s + \frac{0.8021}{Ti}$$

$$s^2 + \frac{1.8021}{386} \cdot s + \frac{0.8021}{386Ti}$$

$$s^2 + 0.00467 \cdot s + \frac{0.00208}{Ti}$$

$$\omega_n^2 = \frac{0.00208}{Ti}$$

$$\omega_n = \frac{0.0456}{\sqrt{Ti}}$$

$$2 \xi \omega_n = 0.00467$$

$$\xi = \frac{0.00467}{2\omega_n}$$

$$\xi = \frac{0.00467}{2 \frac{0.0456}{\sqrt{Ti}}}$$

$$\xi = \frac{0.00467\sqrt{Ti}}{0.0912}$$

$$\xi = 0.0512\sqrt{Ti}$$

$$0.0512\sqrt{Ti} > 0$$

$$Ti > 0$$

Por tanto Ti puede tomar valores mayores a cero en el controlador, para mantener la estabilidad con $Kp = -23.0231$.

Para conocer la ganancia máxima Kp tomando en cuenta el límite de la salida del controlador se analiza el sistema teniendo como entrada la señal de referencia y como salida la respuesta del controlador como se observa en el diagrama de bloques de la Figura 45-2.

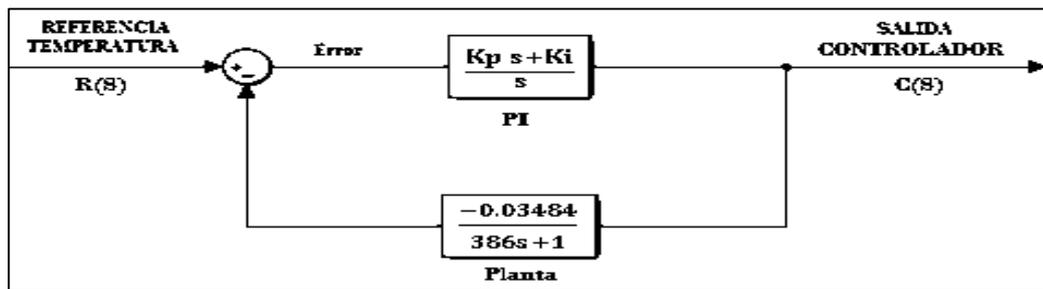


Figura 27-2: Diagrama de bloques del sistema estableciendo como respuesta la salida del controlador.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se obtiene la función de transferencia del lazo cerrado

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{\frac{Kps + Ki}{s}}{1 + \left(\frac{Kps + Ki}{s}\right)\left(\frac{-0.03484}{386s + 1}\right)}$$

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{(Kps + Ki)(386s + 1)}{s(386s + 1)1 + (Kps + Ki)(-0.03484)}$$

$$\frac{C(S)}{R(S)} = \frac{386Kps^2 + Kps + 386Kis + Ki}{386s^2 + s - 0.03484Kps - 0.03484Ki}$$

Se aplica una entrada escalón máxima en el sistema de -5

$$C(S) = \left(\frac{-5}{s}\right) \frac{386Kps^2 + Kps + 386Kis + Ki}{386s^2 + s - 0.03484Kps - 0.03484Ki}$$

Para conocer el valor inicial de la respuesta del controlador se aplica el teorema del valor inicial:

$$\lim_{t \rightarrow 0} [C(t)] = \lim_{s \rightarrow \infty} [s C(s)] = s \left(\frac{-5}{s}\right) \frac{386Kp + \frac{Kp}{s} + \frac{386Ki}{s} + \frac{Ki}{s^2}}{386 + \frac{1}{s} - \frac{0.03484Kp}{s} - \frac{0.03484Ki}{s^2}}$$

$$\lim_{s \rightarrow \infty} [s C(s)] = -5 \left(\frac{386Kp}{386}\right)$$

El valor máximo de salida del controlador corresponde al 93% del ciclo de trabajo de la señal PWM equivalente a una salida del microcontrolador de valor 237 por lo tanto:

$$237 = -5 \left(\frac{386Kp}{386}\right)$$

$$Kp = \frac{237}{-5}$$

$$Kp = -47.4$$

Siendo]0; -47.4] el intervalo de valores que puede tomar la ganancia Kp en el controlador PI.

Se desarrolla el controlador PI con ganancias variables a través de lógica difusa utilizando como base de inferencia el método de TSK. En la Figura 28-2 se observa el diagrama de bloques correspondiente.

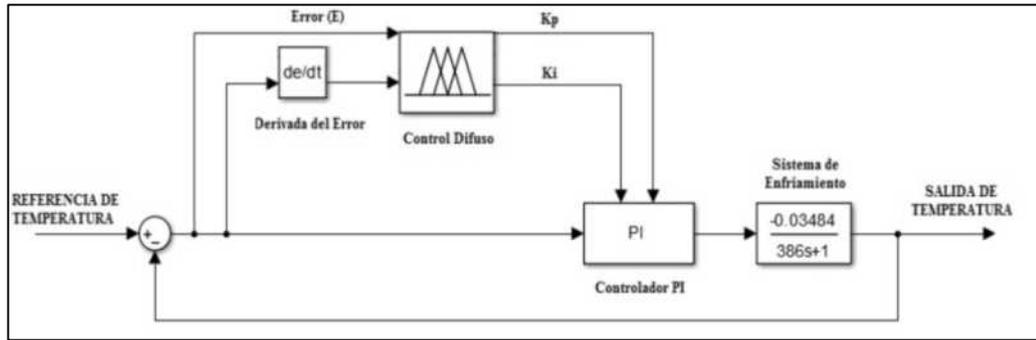


Figura 28-2: Diagrama de bloques del sistema de enfriamiento con un controlador PI con ganancias variables aplicando TSK.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

En el diseño del controlador se define como universos del discurso de entrada al sistema difuso al error y la derivada del error como sucedió en el método de Mamdani y como salidas las ganancias K_p y K_i del controlador PI. Se establece las funciones de pertenencia y rangos del error como se indica en la figura 29-2.

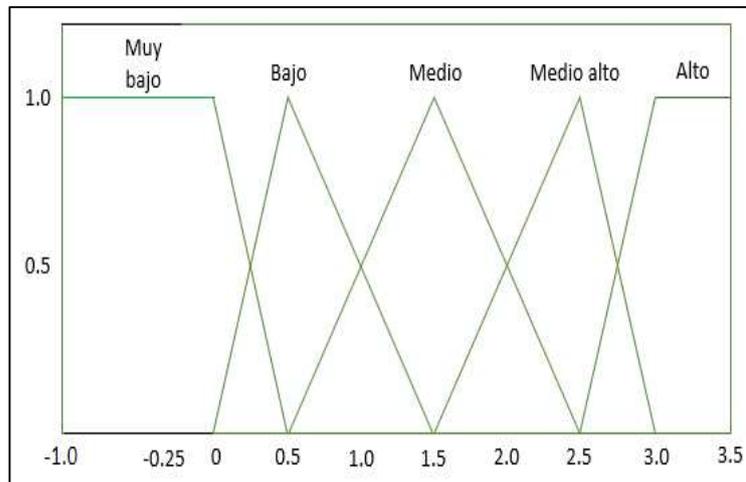


Figura 29-2: Función de pertenencia del error.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Tabla 13-2: Variables lingüísticas del error.

Etiqueta Lingüística	Abreviatura	Rango
Muy bajo	MB	[-1, 0.5]
Bajo	B	[0, 1.5]
Medio	M	[0.5, 2.5]
Medio Alto	MA	[1.5, 3]
Alto	A	[2.5, 3.5]

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se utilizan las mismas etiquetas lingüísticas, abreviaturas, rangos y funciones de pertenencia empleadas en la derivada del error en el método de Mamdani.

Las reglas de la base del conocimiento para inferir aplicando el método de TSK están compuestas por el antecedente difuso y consecuente de la forma singleton. Los consecuentes de las reglas de la base del conocimiento se van variando empíricamente tras ir realizando pruebas del controlador y registrando su comportamiento. Se analiza la respuesta del sistema bajo 6 bases de reglas distintas mostradas en las siguientes tablas:

Tabla 14-2: Base de reglas del conocimiento 1

SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	Kp es	Y Ki es
MB	N	$C_{Kp1} = 23,0231$	$C_{Ki1} = 0,6382$
MB	C	$C_{Kp2} = 23,0231$	$C_{Ki2} = 0,6197$
MB	P	$C_{Kp3} = 23,0231$	$C_{Ki3} = 0,6021$
B	N	$C_{Kp4} = 23,0231$	$C_{Ki4} = 0,5855$
B	C	$C_{Kp5} = 23,0231$	$C_{Ki5} = 0,5699$
B	P	$C_{Kp6} = 23,0231$	$C_{Ki6} = 0,5550$
M	N	$C_{Kp7} = 23,0231$	$C_{Ki7} = 0,5409$
M	C	$C_{Kp8} = 23,0231$	$C_{Ki8} = 0,5275$
M	P	$C_{Kp9} = 23,0231$	$C_{Ki9} = 0,5147$
MA	N	$C_{Kp10} = 23,0231$	$C_{Ki10} = 0,5026$
MA	C	$C_{Kp11} = 23,0231$	$C_{Ki11} = 0,4910$

MA	P	$C_{Kp12} = 23,0231$	$C_{Ki12} = 0,4799$
A	N	$C_{Kp13} = 23,0231$	$C_{Ki13} = 0,4693$
A	C	$C_{Kp14} = 23,0231$	$C_{Ki14} = 0,4592$
A	P	$C_{Kp15} = 23,0231$	$C_{Ki15} = 0,4495$

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Tabla 15-2: Base de reglas del conocimiento 2

SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	Kp es	Y Ki es
MB	N	$C_{Kp1} = 23,0231$	$C_{Ki1} = 0,6382$
MB	C	$C_{Kp2} = 23,0231$	$C_{Ki2} = 0,6079$
MB	P	$C_{Kp3} = 23,0231$	$C_{Ki3} = 0,5802$
B	N	$C_{Kp4} = 23,0231$	$C_{Ki4} = 0,5550$
B	C	$C_{Kp5} = 23,0231$	$C_{Ki5} = 0,5319$
B	P	$C_{Kp6} = 23,0231$	$C_{Ki6} = 0,5106$
M	N	$C_{Kp7} = 23,0231$	$C_{Ki7} = 0,4910$
M	C	$C_{Kp8} = 23,0231$	$C_{Ki8} = 0,4728$
M	P	$C_{Kp9} = 23,0231$	$C_{Ki9} = 0,4559$
MA	N	$C_{Kp10} = 23,0231$	$C_{Ki10} = 0,4402$
MA	C	$C_{Kp11} = 23,0231$	$C_{Ki11} = 0,4255$
MA	P	$C_{Kp12} = 23,0231$	$C_{Ki12} = 0,4118$
A	N	$C_{Kp13} = 23,0231$	$C_{Ki13} = 0,3989$
A	C	$C_{Kp14} = 23,0231$	$C_{Ki14} = 0,3868$
A	P	$C_{Kp15} = 23,0231$	$C_{Ki15} = 0,3754$

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Tabla 16-2: Base de reglas del conocimiento 3.

SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	Kp es	Y Ki es
MB	N	$C_{Kp1} = 32,6928$	$C_{Ki1} = 0,9063$
MB	C	$C_{Kp2} = 32,0021$	$C_{Ki2} = 0,8530$
MB	P	$C_{Kp3} = 31,3114$	$C_{Ki3} = 0,8037$
B	N	$C_{Kp4} = 30,6207$	$C_{Ki4} = 0,4716$
B	C	$C_{Kp5} = 29,9300$	$C_{Ki5} = 0,3771$
B	P	$C_{Kp6} = 29,2393$	$C_{Ki6} = 0,3684$
M	N	$C_{Kp7} = 28,5486$	$C_{Ki7} = 0,3597$
M	C	$C_{Kp8} = 27,8580$	$C_{Ki8} = 0,3510$
M	P	$C_{Kp9} = 27,1673$	$C_{Ki9} = 0,3423$
MA	N	$C_{Kp10} = 26,4766$	$C_{Ki10} = 0,3336$
MA	C	$C_{Kp11} = 25,7859$	$C_{Ki11} = 0,3249$
MA	P	$C_{Kp12} = 25,0952$	$C_{Ki12} = 0,3162$
A	N	$C_{Kp13} = 24,4045$	$C_{Ki13} = 0,3075$
A	C	$C_{Kp14} = 23,7138$	$C_{Ki14} = 0,2988$
A	P	$C_{Kp15} = 23,0231$	$C_{Ki15} = 0,2901$

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Tabla 17-2: Base de reglas del conocimiento 4.

SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	Kp es	Y Ki es
MB	N	$C_{Kp1} = 32,6928$	$C_{Ki1} = 0,9063$
MB	C	$C_{Kp2} = 32,0021$	$C_{Ki2} = 0,8530$
MB	P	$C_{Kp3} = 32,0021$	$C_{Ki3} = 0,8214$
B	N	$C_{Kp4} = 31,3114$	$C_{Ki4} = 0,4822$
B	C	$C_{Kp5} = 31,3114$	$C_{Ki5} = 0,3946$
B	P	$C_{Kp6} = 30,6207$	$C_{Ki6} = 0,3858$
M	N	$C_{Kp7} = 29,9300$	$C_{Ki7} = 0,3771$

M	C	$C_{Kp8} = 29,9300$	$C_{Ki8} = 0,3771$
M	P	$C_{Kp9} = 29,9300$	$C_{Ki9} = 0,3771$
MA	N	$C_{Kp10} = 29,9300$	$C_{Ki10} = 0,3771$
MA	C	$C_{Kp11} = 29,9300$	$C_{Ki11} = 0,3771$
MA	P	$C_{Kp12} = 29,9300$	$C_{Ki12} = 0,3771$
A	N	$C_{Kp13} = 29,9300$	$C_{Ki13} = 0,3771$
A	C	$C_{Kp14} = 23,7138$	$C_{Ki14} = 0,2988$
A	P	$C_{Kp15} = 23,0231$	$C_{Ki15} = 0,2901$

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Tabla 18-2: Base de reglas del conocimiento 5.

SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	Kp es	Y Ki es
MB	N	$C_{Kp1} = 23,0231$	$C_{Ki1} = 0,9118$
MB	C	$C_{Kp2} = 23,7138$	$C_{Ki2} = 0,8765$
MB	P	$C_{Kp3} = 24,4045$	$C_{Ki3} = 0,8457$
B	N	$C_{Kp4} = 25,0952$	$C_{Ki4} = 0,2899$
B	C	$C_{Kp5} = 26,4766$	$C_{Ki5} = 0,3058$
B	P	$C_{Kp6} = 27,1673$	$C_{Ki6} = 0,5380$
M	N	$C_{Kp7} = 27,8580$	$C_{Ki7} = 0,5516$
M	C	$C_{Kp8} = 28,5486$	$C_{Ki8} = 0,5653$
M	P	$C_{Kp9} = 29,9300$	$C_{Ki9} = 0,5927$
MA	N	$C_{Kp10} = 31,3114$	$C_{Ki10} = 0,5986$
MA	C	$C_{Kp11} = 32,6928$	$C_{Ki11} = 0,6042$
MA	P	$C_{Kp12} = 34,0742$	$C_{Ki12} = 0,6094$
A	N	$C_{Kp13} = 35,4556$	$C_{Ki13} = 0,6143$
A	C	$C_{Kp14} = 36,8370$	$C_{Ki14} = 0,6382$
A	P	$C_{Kp15} = 36,8370$	$C_{Ki15} = 0,6382$

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Tabla 19-2: Base de reglas del conocimiento 6.

SI el error (E) es	Y la derivada del error (dE) es	Kp es	Y Ki es
MB	N	$C_{Kp1} = 23,0231$	$C_{Ki1} = 0,9118$
MB	C	$C_{Kp2} = 26,2463$	$C_{Ki2} = 0,9701$
MB	P	$C_{Kp3} = 27,8580$	$C_{Ki3} = 0,8581$
B	N	$C_{Kp4} = 29,4696$	$C_{Ki4} = 0,4085$
B	C	$C_{Kp5} = 31,0812$	$C_{Ki5} = 0,2534$
B	P	$C_{Kp6} = 32,6928$	$C_{Ki6} = 0,2666$
M	N	$C_{Kp7} = 34,3044$	$C_{Ki7} = 0,2377$
M	C	$C_{Kp8} = 35,9160$	$C_{Ki8} = 0,2620$
M	P	$C_{Kp9} = 37,5277$	$C_{Ki9} = 0,2601$
MA	N	$C_{Kp10} = 39,1393$	$C_{Ki10} = 0,2583$
MA	C	$C_{Kp11} = 40,7509$	$C_{Ki11} = 0,2456$
MA	P	$C_{Kp12} = 42,3625$	$C_{Ki12} = 0,2796$
A	N	$C_{Kp13} = 43,9741$	$C_{Ki13} = 0,2903$
A	C	$C_{Kp14} = 45,5857$	$C_{Ki14} = 0,2872$
A	P	$C_{Kp15} = 47,1974$	$C_{Ki15} = 0,2844$

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se sigue el procedimiento de fusificación para el error y la derivada del error. Se realiza la inferencia aplicando el método TSK para establecer el grado de pertenencia μ de las reglas de la base del conocimiento bajo la cual se infiera. Se obtiene los valores de las ganancias proporcionales Kp e integral Ki en la etapa de defusificación aplicando:

$$Kp = \frac{\sum \mu C_{Kp}}{\sum \mu}$$

$$Ki = \frac{\sum \mu C_{Ki}}{\sum \mu} \quad (4)$$

Donde μ es el grado de pertenencia al consecuente de la regla activada, C_{Kp} el valor del singleton consecuente de Kp y C_{Ki} el valor del singleton consecuente de Ki de la misma regla activada.

2.6 Experimentación

Se emplean 3 días para la toma de datos de las respuestas del sistema de enfriamiento con cada uno de los controladores desarrollados. La experimentación se realiza en un ambiente libre de otro equipo de generación de calor. El horario de pruebas está dentro de las 10:00 am a 13:00 pm cada día. La temperatura ambiental varía entre 18 y 23 °C mientras la temperatura del agua antes de su ingreso al sistema se encuentra dentro de los 17 y 21 °C. El tubo láser de CO₂ se activa a una potencia del 75% y se mantiene el nivel para todas las pruebas. Se eleva la temperatura de referencia del sistema hasta el límite óptimo esto es 25°C. Una vez establecida la temperatura se aplica una entrada de referencia de 22 °C y se recolecta los valores de variación de la temperatura bajo cada uno de los controladores para su posterior análisis.

CAPITULO III

3. MARCO DE ANÁLISIS Y RESULTADOS

En el presente capítulo se presenta los resultados de las pruebas realizadas a cada uno de los controladores desarrollados en el capítulo anterior. Después de la implementación de cada controlador se registró los datos de comportamiento de la temperatura del refrigerante en el sistema para el análisis de la curva de respuesta. Se realizó el análisis de la dinámica tanto para el estado transitorio como para el estable.

3.1 Estado transitorio

Los parámetros característicos que se establecieron para el análisis de la respuesta son los siguientes:

- Tiempo de Retardo T_d .
- Tiempo de Levantamiento T_r .
- Sobrepasso Máximo M_p .
- Tiempo de Asentamiento T_s .

El T_r para respuestas con sobrepasso se tomó como el tiempo requerido para pasar del 0 al 100% de la respuesta. Mientras para respuestas sin sobrepasso el tiempo requerido para pasar del 10 al 90%. El M_p se calculó en porcentaje por cuanto el valor final de la respuesta es distinto a la unidad. Se utilizó el 5% como banda de tolerancia para el T_s .

3.1.1 Controlador clásico proporcional integral (PI)

La curva de respuesta del sistema bajo el control PI clásico sintonizado a través del método de Zingler&Nichols y la respuesta del controlador se muestran en las Figura 1-3, 2-3.

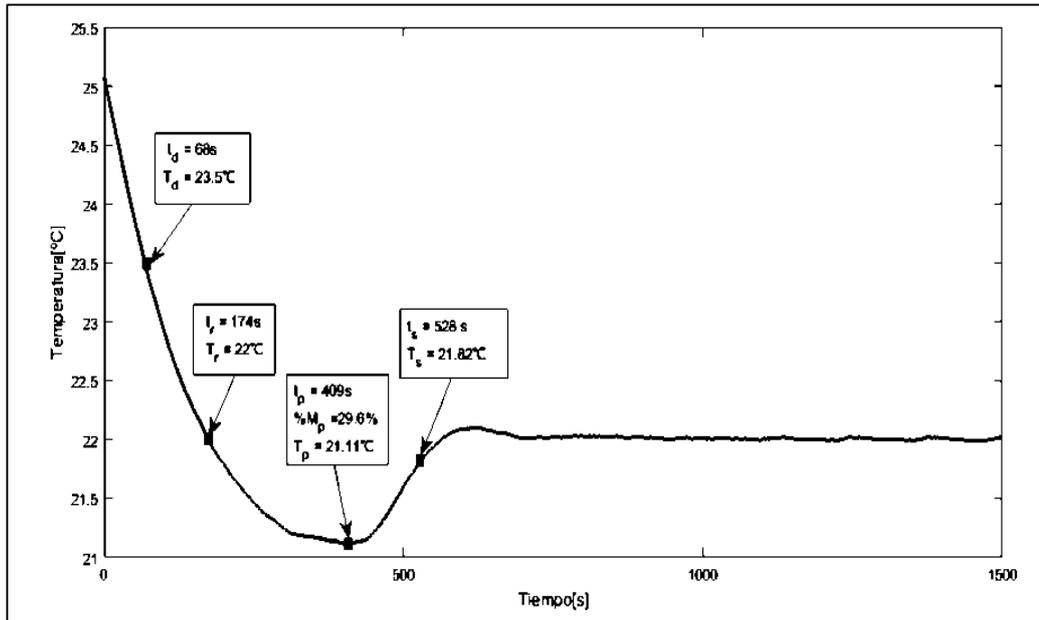


Figura 1-3: Curva de respuesta de la temperatura con un controlador PI clásico.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

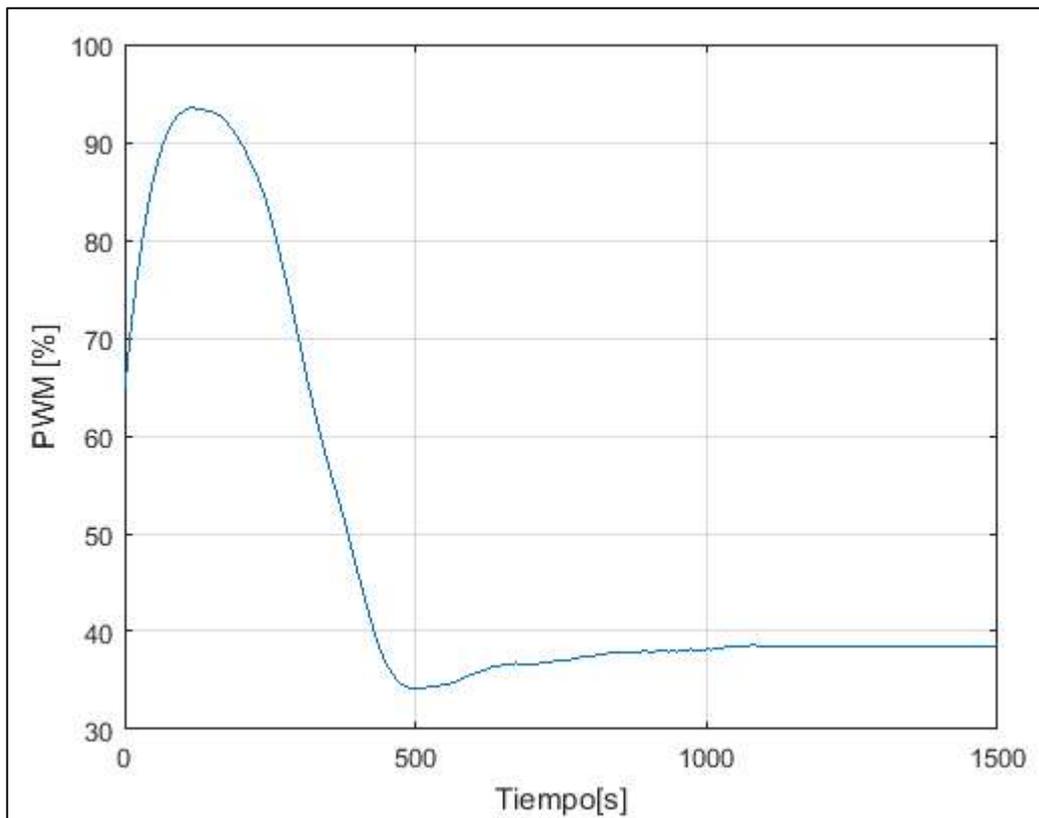


Figura 2-3: Curva de respuesta del controlador PI clásico.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

3.1.2 Controlador difuso Mamdani

La curva de respuesta del sistema bajo el control difuso con el método de inferencia de Mamdani y la respuesta del controlador se muestran en las Figuras 3-3, 4-3.

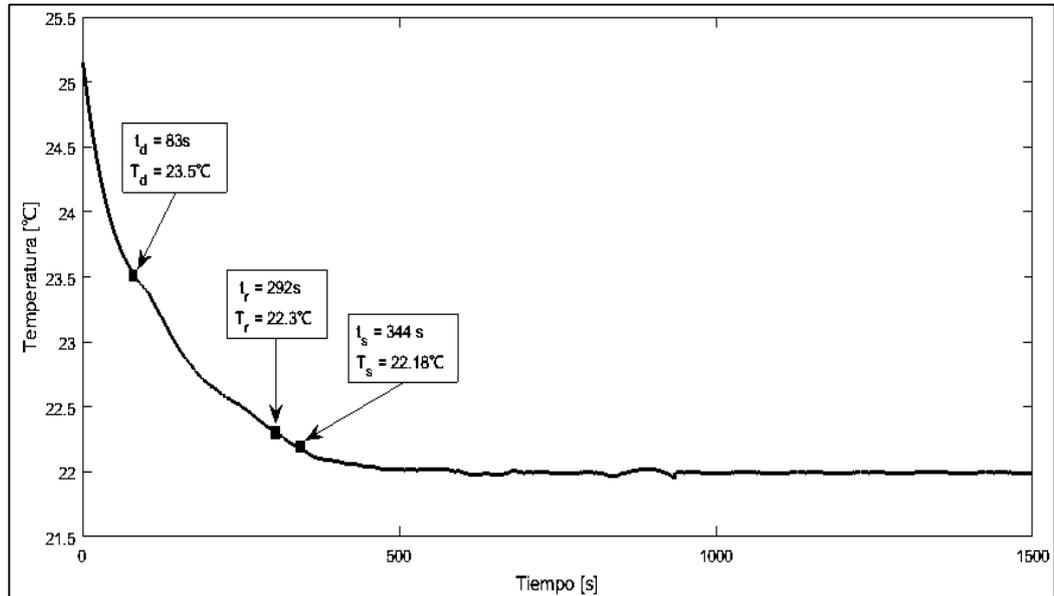


Figura 3-3: Curva de respuesta de la temperatura con un controlador de Mamdani.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

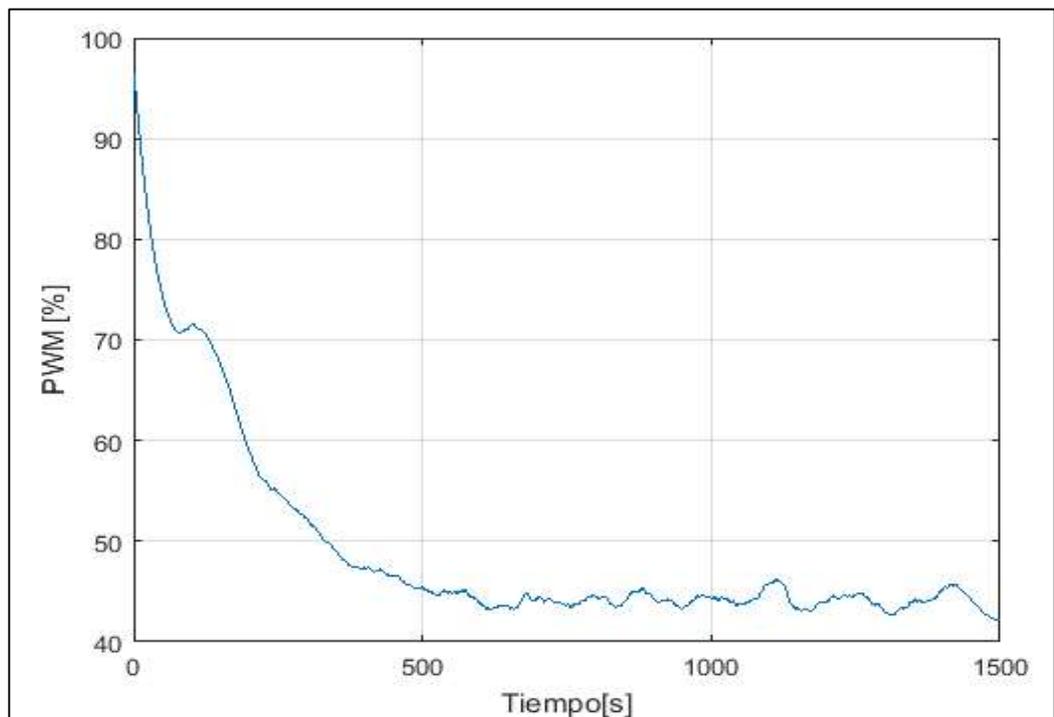


Figura 4-3: Curva de respuesta del controlador Mamdani.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

3.1.3 Controlador difuso Takagi-Sugeno-Kang (TSK)

La curva de respuesta del sistema bajo el control difuso con el método de inferencia de TSK y la respuesta del controlador se muestran en las Figura 5-3,6-3.

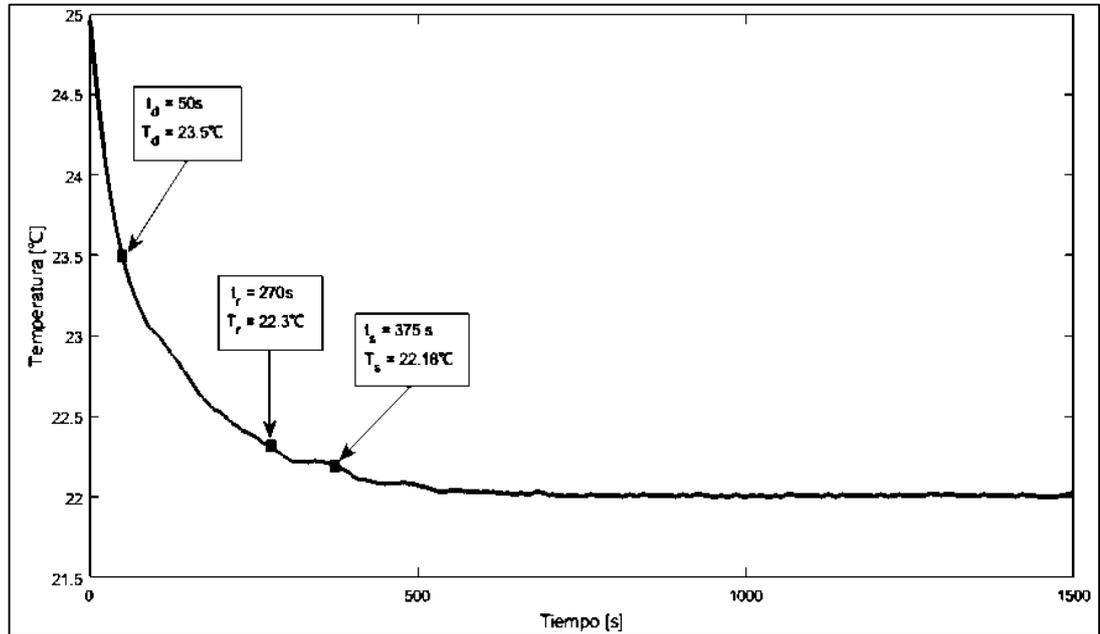


Figura 5-3: Curva de respuesta de la temperatura con un controlador TSK.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

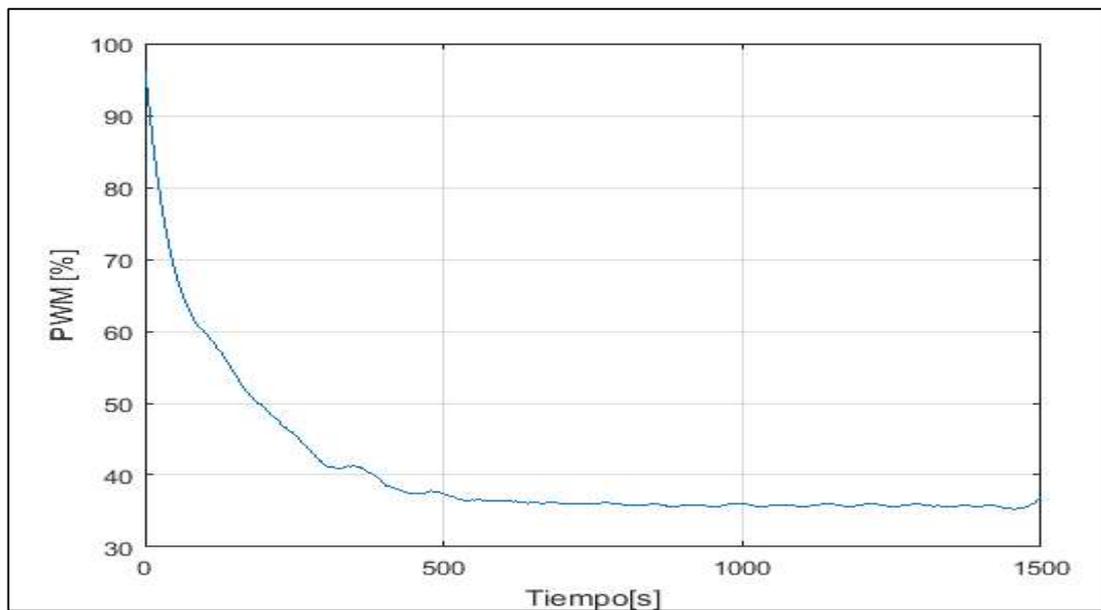


Figura 6-3: Curva de respuesta del controlador TSK.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

3.1.4 Controlador clásico PI con ganancias variables Takagi- Sugeno-Kang (TSK)

Las curvas de respuesta de temperatura del sistema bajo el control clásico pi con ganancias variables K_p y K_i aplicando el método de inferencia de TSK con 6 bases del conocimiento distintas y las respuesta del controlador se muestran en las Figuras 7-3 a 18-3.

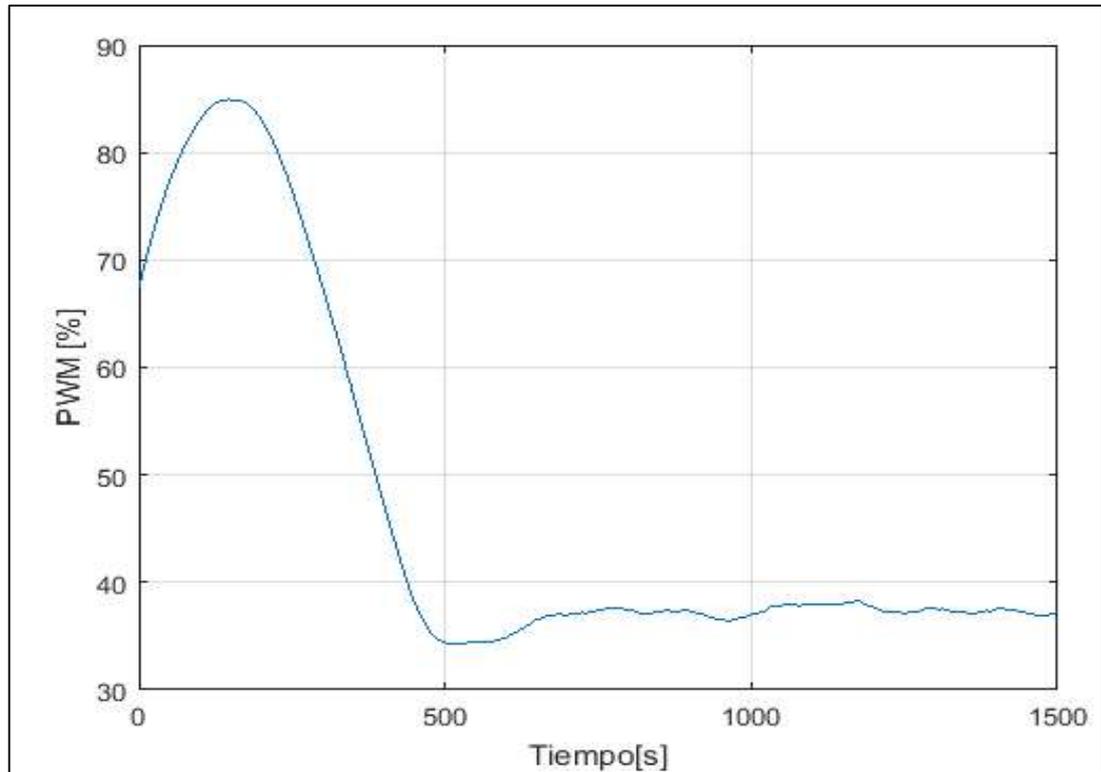


Figura 7-3: Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 1.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

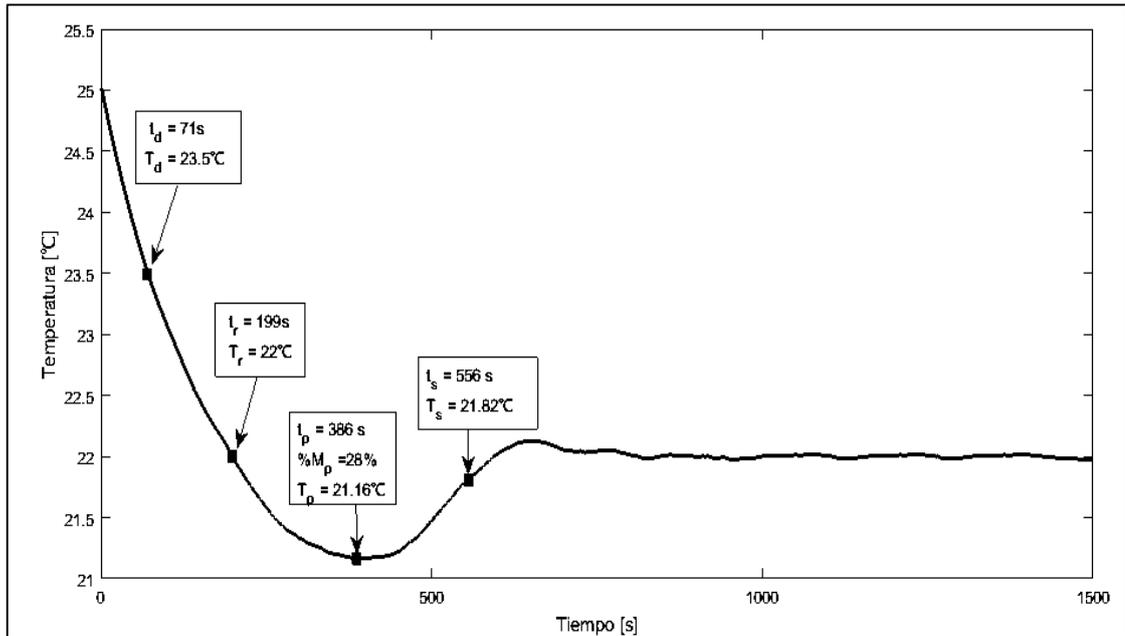


Figura 8-3: Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 1.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

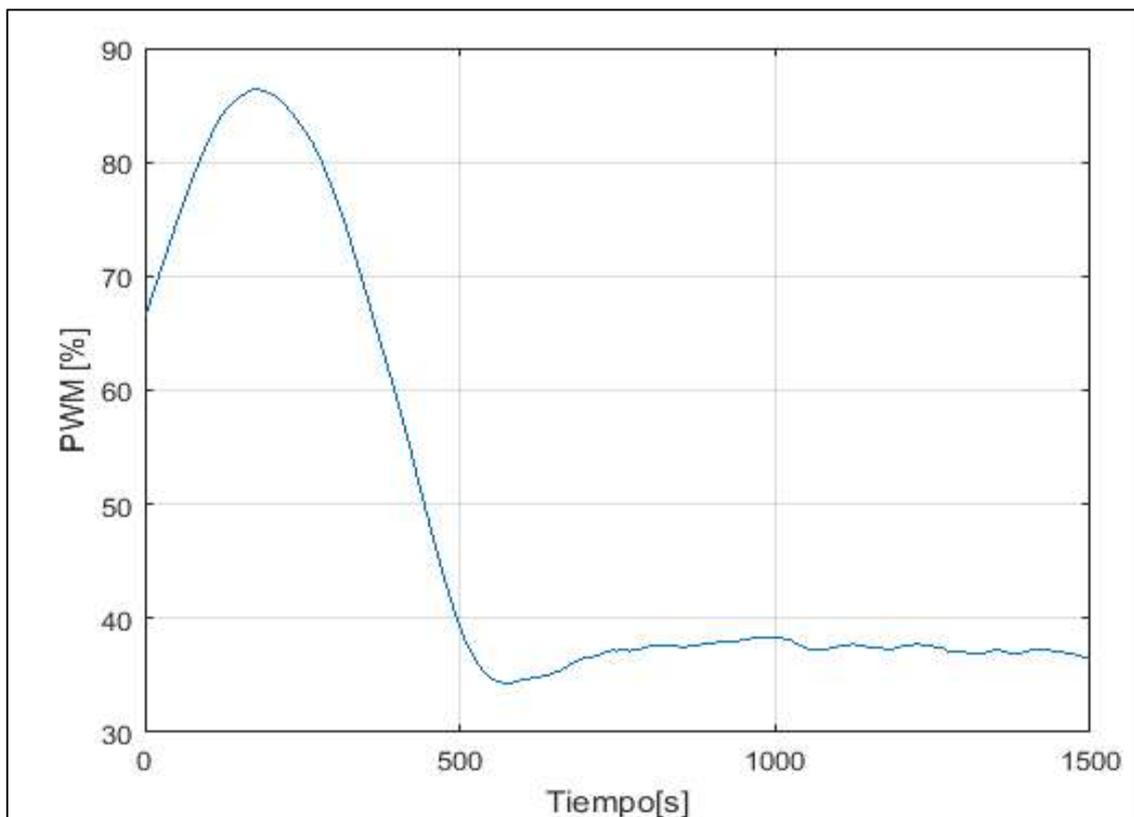


Figura 9-3: Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 2.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

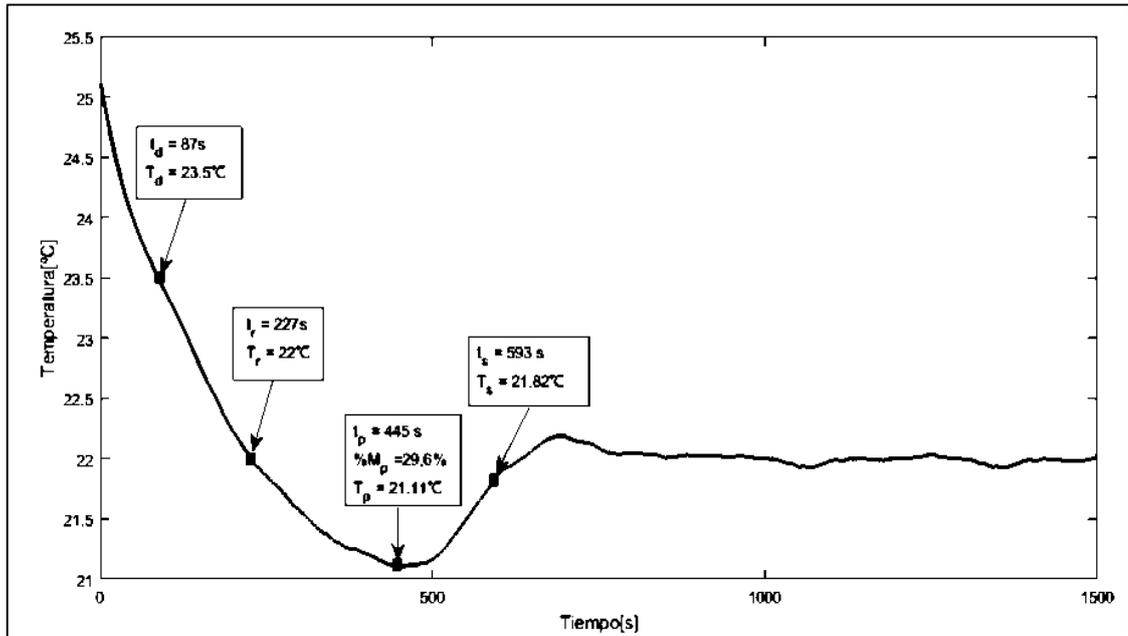


Figura 10-3: Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 2.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

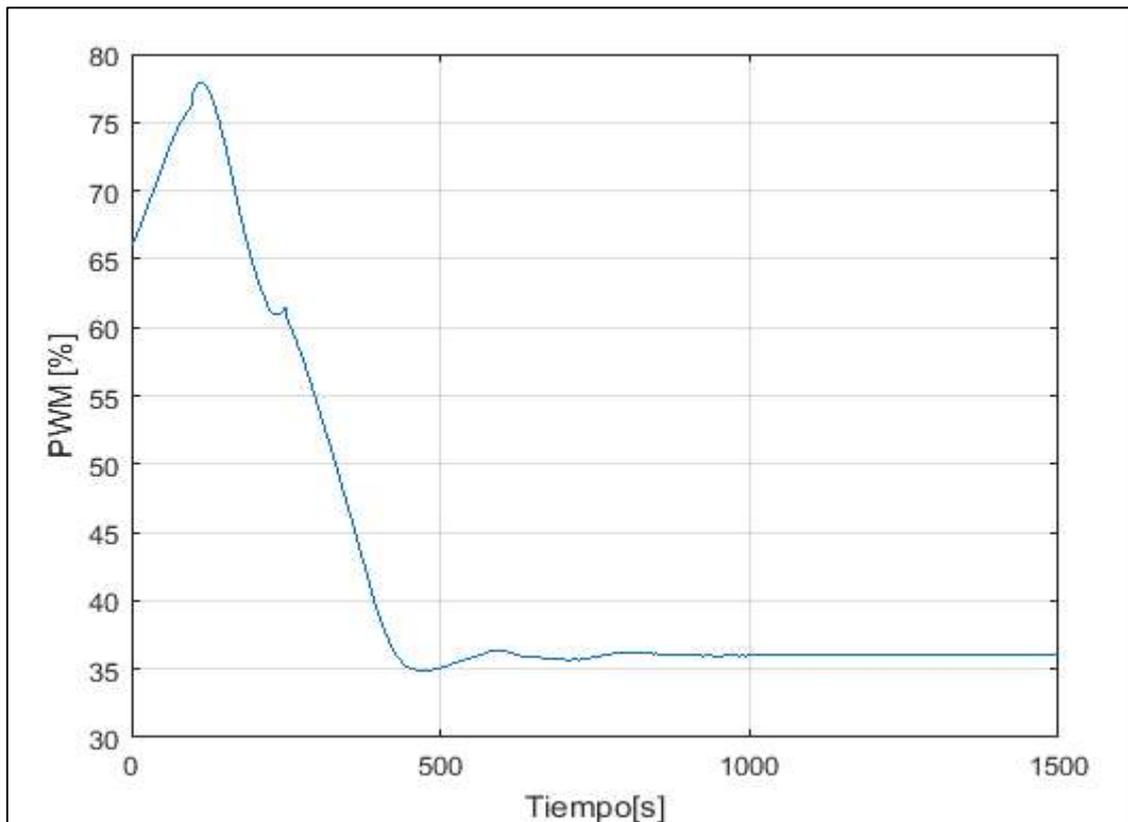


Figura 11-3: Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 3.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

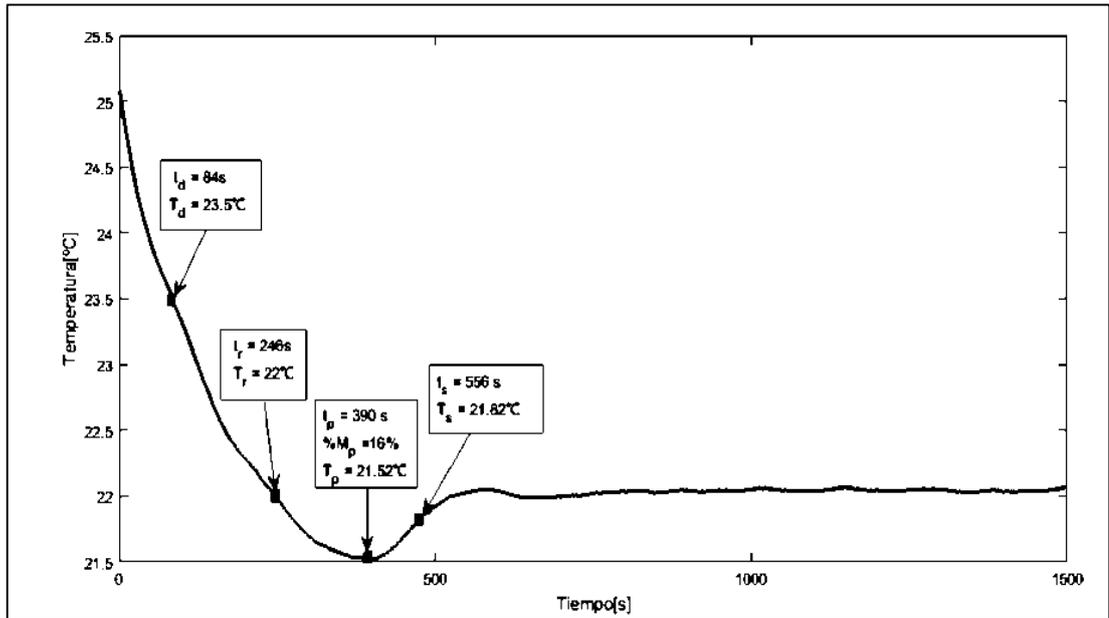


Figura 12-3: Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 3.
 Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

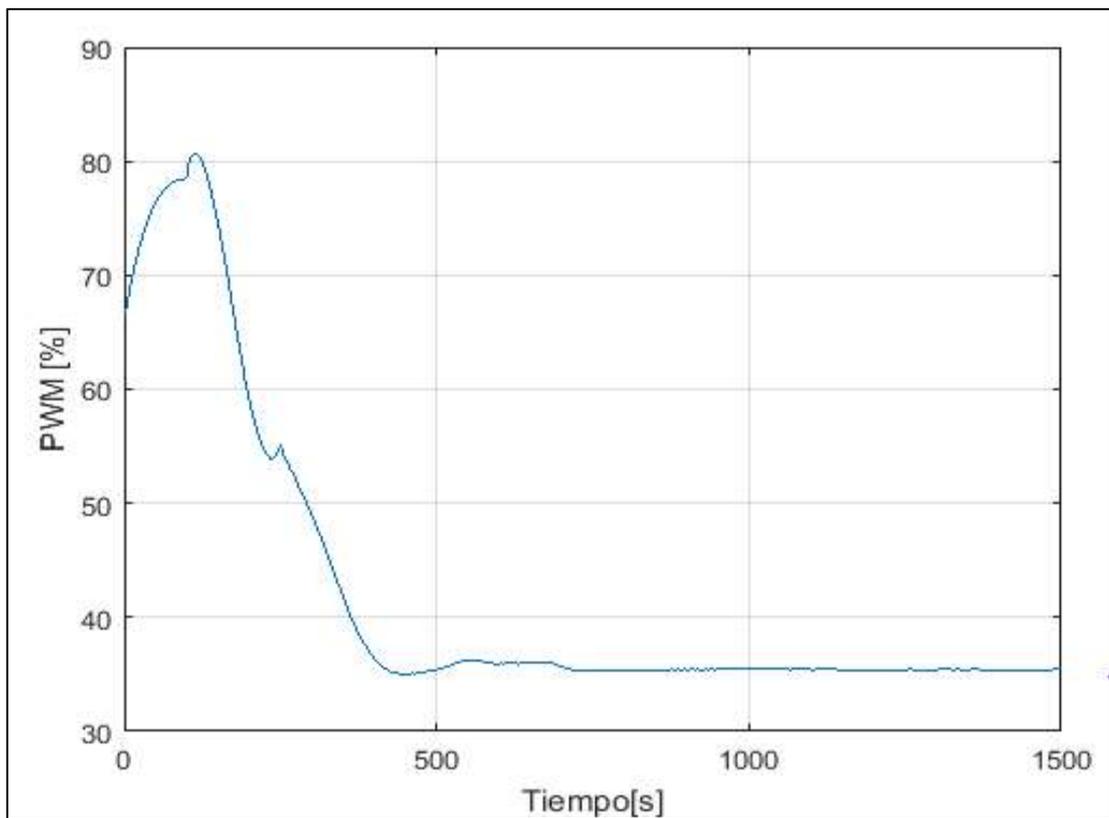


Figura 13-3: Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 4.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

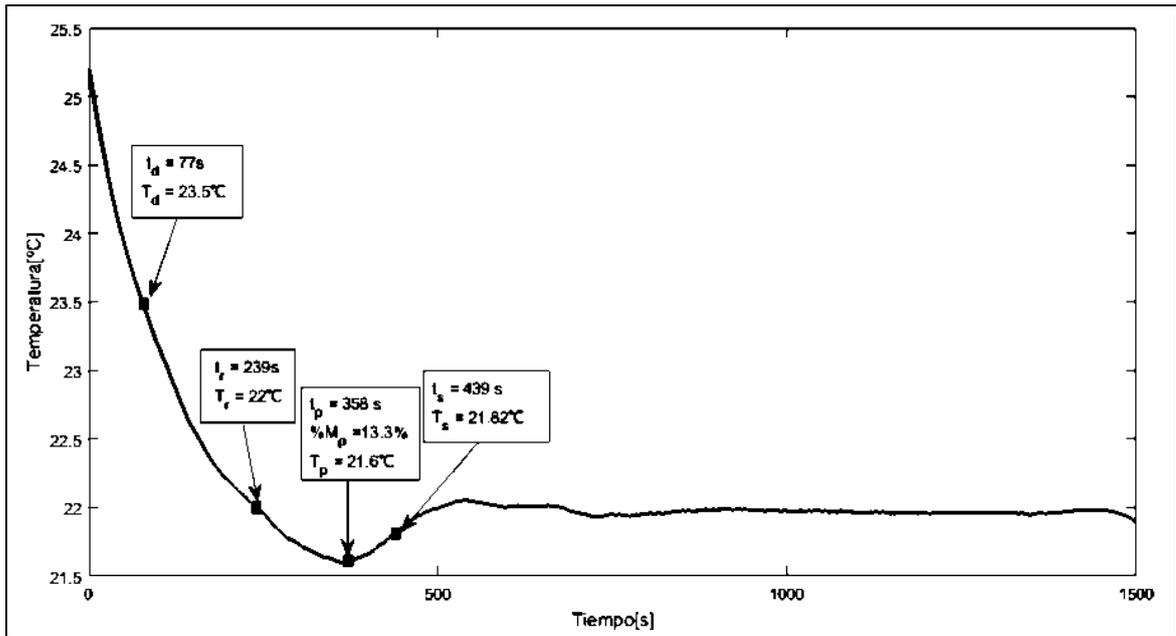


Figura 14-3: Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 4.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

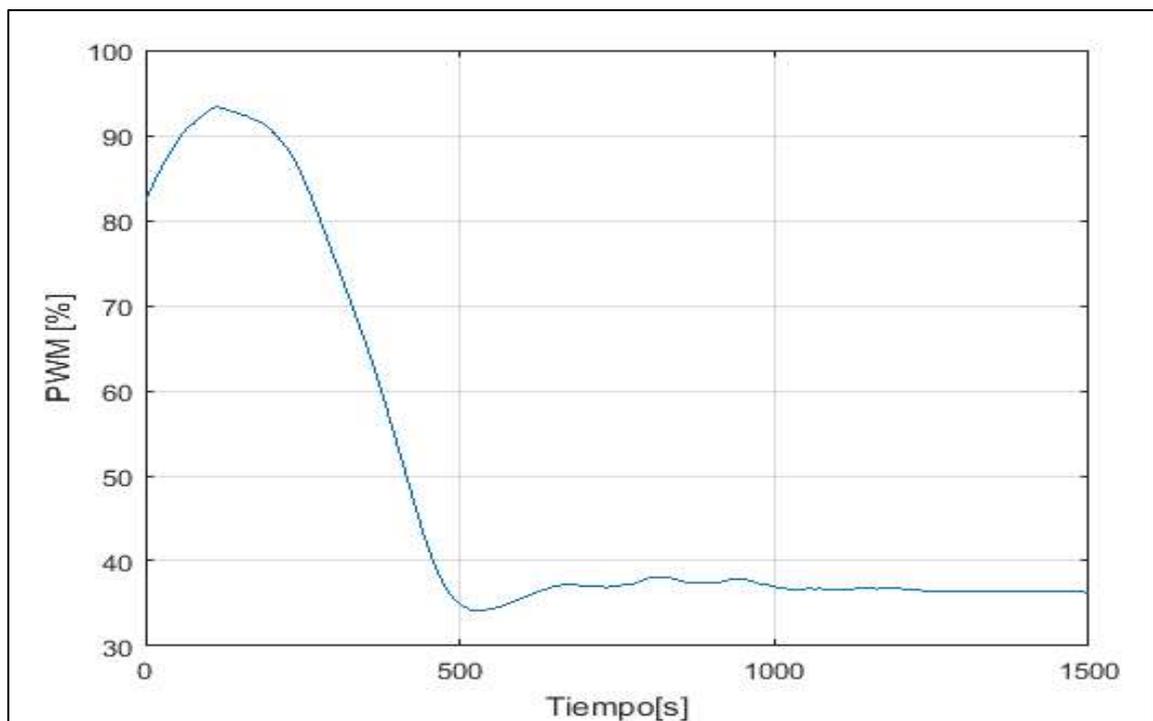


Figura 15-3: Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 5.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

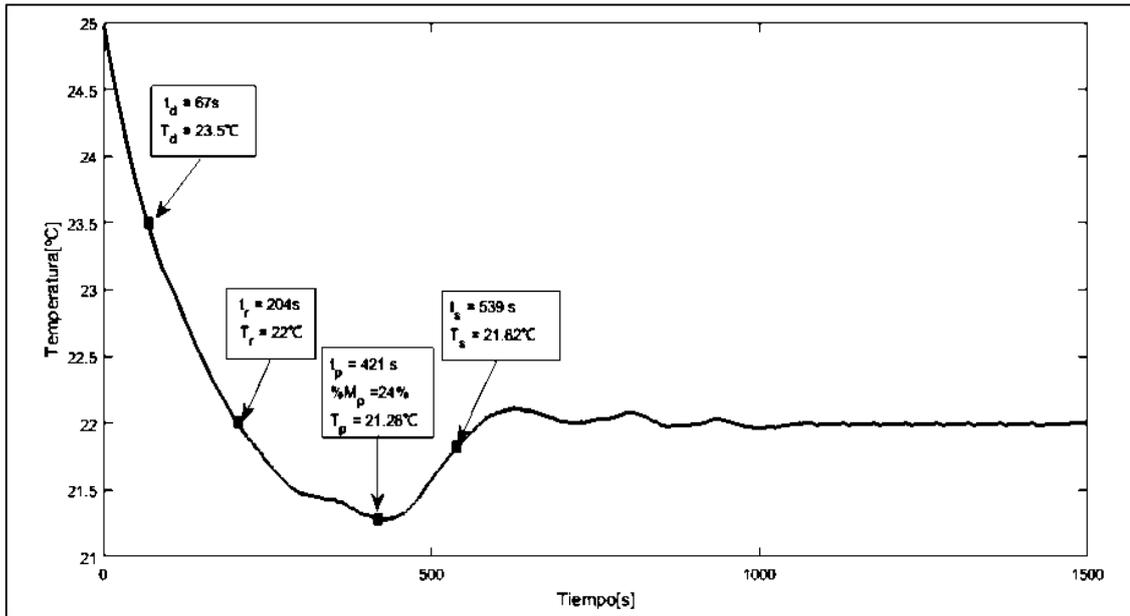


Figura 16-5: Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 5.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

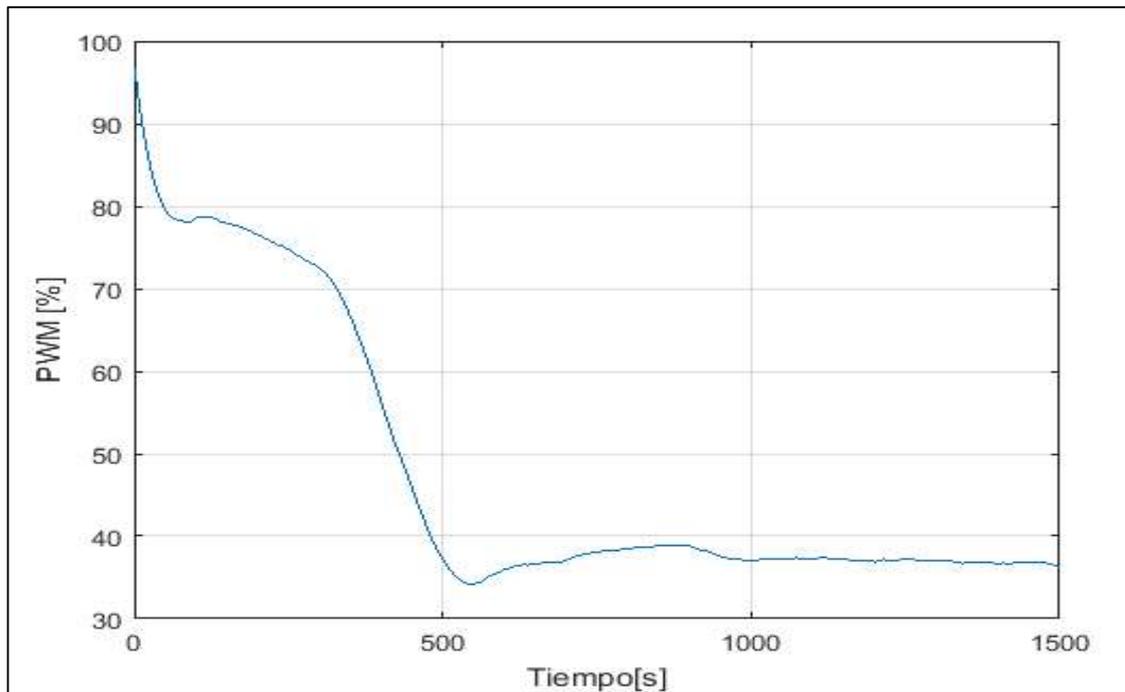


Figura 17-3: Curva de respuesta del controlador utilizando la base del conocimiento 6.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

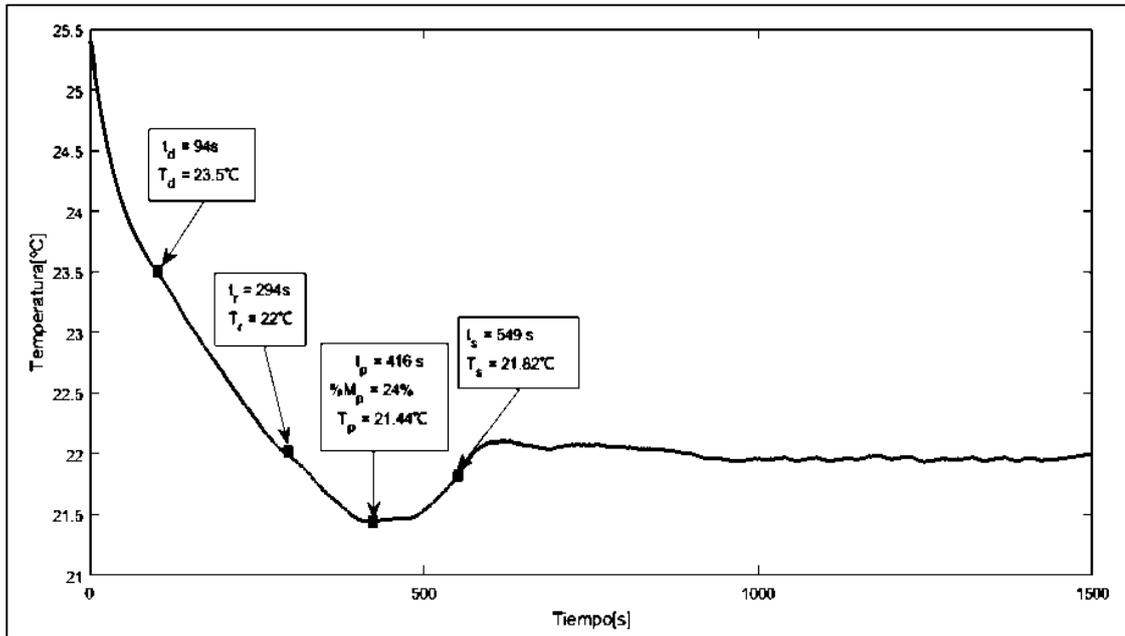


Figura 18-3: Curva de respuesta del sistema utilizando la base del conocimiento 6.

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Los valores de los parámetros característicos de la respuesta del sistema de enfriamiento obtenidos con el controlador clásico PI de ganancias variables se resumió en la Tabla 1.3, para cada una de las bases de reglas (BR) empleadas.

Tabla 1-3: Valores de los parámetros característicos de respuesta del sistema.

Parámetros	BR 1	BR 2	BR 3	BR 4	BR 5	BR 6
Tiempo de Retardo T_d [s]	71	87	84	77	67	94
Tiempo de Levantamiento T_r [s]	199	227	246	239	204	294
Sobrepaso Máximo M_p [%]	28	29.6	16	13.3	24	18.6
Tiempo de Asentamiento T_s [s]	556	593	556	439	539	549

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

De la Tabla 1-3, se identificó como las mejores respuestas en cada parámetro aquellas con una variación porcentual menor al 15% con respecto a la respuesta de menor valor en el parámetro. Así se determinó que el comportamiento utilizando BR1, BR4 y BR5 presentó un mejor T_d sobre las demás. El T_r más favorable en las respuestas se observó bajo BR5 y BR2. Mientras la respuesta

con M_p de mejor comportamiento se presentó empleando la BR4 y bajo la misma se obtuvo el mejor T_s . En la tabla 2-3 se identifica con facilidad las mejores respuestas en cada parámetro bajo las distintas bases de reglas.

Tabla 2-3: Mejoras bajo distintos parámetros

Parámetros	BR 1	BR 2	BR 3	BR 4	BR 5	BR 6
Tiempo de Retardo T_d [s]	✓			✓	✓	
Tiempo de Levantamiento T_r [s]		✓			✓	
Sobrepaso Máximo M_p [%]				✓		
Tiempo de Asentamiento T_s [s]				✓		

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Se estableció la respuesta del sistema bajo la base de reglas 4 como la de mejor comportamiento al estar dentro de los valores más favorables de respuesta en la mayoría de los parámetros característicos. Una vez definida la mejor respuesta bajo el controlador PI clásico con ganancias variables se comparó con las respuestas bajo los controladores: PI clásico, Difuso con el método de Mamdani y Difuso con el método TSK. Dicha comparación se muestra en la Tabla 3.3.

Tabla 3-3: Comparación de controladores

Parámetros	Controlador Clásico PI	Controlador Difuso Mamdani	Controlador Difuso TSK	Controlador Clásico PI con ganancias variables TSK
Tiempo de Retardo T_d [s]	68	83	50	77
Tiempo de Levantamiento T_r [s]	174	292	270	239
Sobrepaso Máximo M_p [%]	29.6	0	0	13.3
Tiempo de Asentamiento T_s [s]	528	344	375	439

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Como en el caso de comparación anterior así mismo se identificó las mejores respuestas para cada parámetro a aquellas con una variación porcentual menor al 15% con respecto a la de menor valor. Siendo así la respuesta del sistema con control difuso aplicando TSK mostró un menor T_d . El T_r más favorable se produjo bajo el control clásico PI. Mientras el M_p se mostró totalmente nulo para los controladores difusos aplicando Mamdani y TSK. El T_s es otro de los parámetros en el cual los mismos controladores presentaron una mejor respuesta. En la Tabla 4-3, se identifica con mayor facilidad las mejores respuestas de los controladores. Se estableció como mejores respuestas en estado transitorio a aquellas obtenidas bajo los controladores difusos tipo Mamdani y TSK con un porcentaje de sobrepaso nulo y menor tiempo de asentamiento.

Tabla 4-3: Comparación de Controladores

Parámetros	Controlador Clásico PI	Controlador Difuso Mamdani	Controlador Difuso TSK	Controlador Clásico PI con ganancias variables TSK
Tiempo de Retardo T_d [s]			✓	
Tiempo de Levantamiento T_r [s]	✓			
Sobrepaso Máximo M_p [%]		✓	✓	
Tiempo de Asentamiento T_s [s]		✓	✓	

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

3.2 Estado estacionario

Para el análisis se empleó el error cuadrático medio (RMSE) de los datos en estado estable para cada controlador. El valor de referencia de temperatura frente al cual se mide la cantidad de error es de 22°C. Se tomaron 908 datos en estado estacionario para la aplicación de la ecuación (2).

En la Tabla 5-3 se muestran los valores RMSE obtenidos con cada controlador en el sistema. Se confirma una desviación de las respuestas con todos los controladores dentro de la banda de tolerancia del 5% del valor final. Sin embargo se identificó un menor error en estado estable para

los controladores PI clásico, Difuso con inferencia de TSK y PI clásico con ganancias variables aplicando TSK.

Tabla 5-3: RMS de los controladores.

	Controlador Clásico PI	Controlador Difuso Mamdani	Controlador Difuso TSK	Controlador Clásico PI con ganancias variables TSK
RMSE	0,108228	0,15422	0,103303	0,103568

Realizado por: Cuenca y Yumbillo, 2018.

Realizadas las comparaciones tanto en estado transitorio como estacionario de los distintos controladores se estableció el controlador difuso aplicado inferencia TSK como el más efectivo en el sistema de enfriamiento del láser CO₂. Este controlador presenta una respuesta transitoria suavizada, sin sobrepaso y tiempo de establecimiento mejor. Así también el RMSE que presenta en estado estacionario es bajo.

CONCLUSIONES

- La utilización del filtro de Savitzky-Golay de Matlab para el procesamiento de los datos registrados permite limpiar la señal disminuyendo el efecto del ruido sumado a la señal útil. Su aplicación permite que las características de la dinámica sean preservadas sin perder la información propia del comportamiento. Esto toma gran importancia al momento de establecer el modelo matemático más aproximado que le corresponde al sistema según su respuesta en el tiempo.
- Del modelo matemático obtenido se identifica que el sistema de enfriamiento amerita un controlador de acción inversa. Por cuanto al elevarse la temperatura de referencia el actuador debe disminuir el valor de su salida. Mientras al disminuir la referencia la salida del controlador debe incrementarse para alcanzar la temperatura de consigna.
- El control difuso aplicando el método de inferencia de Mamdani resulta muy intuitivo al momento de diseñarlo por cuanto no necesita precisión al momento de establecer entradas, salidas y reglas del sistema. Así como tampoco se hace necesario un modelamiento matemático del sistema para establecer un control. Sin embargo resulta el más complejo al momento de implementarlo. Por cuanto obtener un valor de salida en la etapa de defusificación empleando el método del centroide, para hallar el centro de área, presenta mayor dificultad debido a la cantidad de reglas de la base del conocimiento.
- El sistema bajo el controlador difuso con el método de inferencia TSK presenta un comportamiento similar bajo el controlador difuso con el método de Mamdani. Mientras en comparación con el controlador clásico PI se identifica que el sobrepaso de la temperatura obtenido con el control clásico no se produce con el controlador difuso TSK. Además el tiempo de asentamiento se reduce en el difuso a pesar de incrementarse su tiempo de levantamiento. La implementación de este controlador en un microcontrolador resulta de menor complejidad.
- El control PI clásico con ganancias variables aplicando TSK como método de inferencia, muestra respuestas mejoradas según la base de reglas bajo la cual se realiza el control. Se obtiene un menor sobre impulso y tiempo de asentamiento, aplicando la base de reglas 4 en este caso, en comparación a la respuesta con control clásico de ganancias fijas. Se comprueba que un controlador clásico PI con ganancias variantes puede mejorar el comportamiento del sistema según la base de reglas de conocimiento que se aplique.

- De entre los controladores con aplicación de lógica difusa se determina que el controlador con inferencia TSK posee un diseño e implementación más sencilla. Además de una mejor respuesta en el sistema de enfriamiento dentro de los parámetros de tiempo de establecimiento y sobrepaso. Por tanto es el controlador que se escoge para el control definitivo de la temperatura del sistema de enfriamiento del tubo láser de CO₂.
- El sistema de control implementado en la planta de enfriamiento evita los sobrecalentamientos que provoca la activación del láser. Manteniendo el sistema dentro del rango de temperatura adecuado para su trabajo. Contribuyendo al cumplimiento del tiempo de vida determinado por el fabricante bajo condiciones óptimas.
- El sistema de enfriamiento por agua en la actualidad es uno de los sistemas más eficientes por cuanto no requieren de gastos elevados para su operación.

RECOMENDACIONES

- En futuros trabajos en cuanto al controlador PI de ganancias variables se puede mejorar la respuesta del sistema. Empleando algoritmos genéticos para la optimización de los singletones que forman parte de la base de reglas de conocimiento con inferencia TSK.
- Para la identificación de las mejores respuestas del sistema. En el proceso de comparación según los tipos de controladores. Se puede establecer como límite de variación porcentual un porcentaje menor al 15%. Así se establece mayor selectividad al momento de determinar cuál es el mejor.
- Para iniciar el proceso del sistema de enfriamiento es importante hacerlo con el líquido refrigerante totalmente lleno tanto en el radiador como en el tubo láser de lo contrario esto puede provocar la aparición de burbujas recorriendo la planta por ende un funcionamiento inadecuado.
- El depósito del refrigerante debe mantenerse totalmente cubierto para evitar la infiltración de impurezas que llegan a impregnarse al interior del tubo láser provocando su deterioro. Por lo mismo el refrigerante utilizado debe estar previamente purificado a su ingreso en el sistema.

BIBLIOGRAFIA

ALDAZ TOALA, Jorge Luis, & INFANTE SALAS, Jefferson Alberto. Aplicación del control difuso utilizando PLD, en un turbo mezclador y un evaporador eléctrico para el Laboratorio de Procesos Industriales. [en línea]. (tesis) (pregrado) Escuela Ingeniería Química ESPOCH, Ecuador.2017. [Consulta: 4 mayo 2018]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/7619>.

Análisis Motores. *Refrigeración del motor del automóvil.* [blog], 2016. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.aficionadosalamecanica.com/refrigeracion-motor.htm>.

Arduino Due. *Conceptos Arduino.* [en línea], 2014. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <http://arduino.cl/arduino-due/>.

Atmega328P Microcontrolador AVR. *Conceptos Geek Factory.* [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <https://www.geekfactory.mx/tienda/componentes-electronicos/circuitos-integrados/atmega328p-microcontrolador-avr/>.

BEDOYA RUIZ, Diana Patricia., Evaluación de aprendizaje por competencias utilizando lógica difusa. [En línea]. (tesis) (pregrado) Universidad de Antioquia Medellin 2014. [Consulta: 14 abril 2018]. Disponible en: http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/5739/1/BedoyaDiana_2016_Evaluacionaprendizajecompetencias.pdf.

Bomba de Diafragma 12 V. Datos Técnicos. [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: https://articulo.mercadolibre.com.co/MCO-475216165-12v-diafragma-agua-bomba-micro-automatico-interruptor--_JM.

CASIGNIA VASCONEZ, Byron Andrés. Diseño e implementación de un controlador neuro-difuso para un motor de corriente continua. [En línea]. (tesis) (pos pregrado) ESPOCH, Ecuador, 2016 [Consulta: 27 marzo 2018]. Disponible en: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/6089>.

CAZCO, R., & GORDÓN, D. Diseño y construcción de una plataforma CNC de corte por láser en láminas de acrílico y madera MDF de hasta 6mmde espesor para el laboratorio de procesos de manufactura. [En línea]. (tesis) (pregrado) Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, Ecuador 2015. [Consulta: 16 abril 2018]. Disponible en: <http://repositorio.espe.edu.ec/jspui/handle/21000/11223>.

Colegio de Ingenieros España. *Técnicas disponibles para los sistemas de refrigeración industrial.* [en línea]. 2016. Disponible en: <http://www.prtr-es.es/data/images/Resumen%20Ejecutivo%20BREF%20Refrigeraci%C3%B3n%20y%20Vac%C3%ADo-0BBE00E0169AC61A.pdf>.

Display LCD 16x2. *Datos Técnicos.* [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <https://www.electronicoscaldas.com/displays-lcd-alfanumericos-y-graficos/131-display-lcd-16x2-el-1602a.html>.

Duarte, O. *Sistemas de Lógica Difusa Fundamentos* [en línea]. Colombia 1999. *Universidad de Colombia*, vol. 42, pp. 22. [Consulta: 15 octubre 2018]. Disponible en: <http://artemisa.unicauca.edu.co/~wpantoja/web/inteligenciaartificial/fuzzy.pdf>.

Embroidery Compañía. *CFL-CMA K Series con Rotary Tool y Mesa Up-Down 2010-2011-2012.pdf.* [en línea], 2012. [Consulta: 27 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.camfive.com/upload/manuales/CFL-CMA%20K%20Series%20con%20Rotary%20Tool%20y%20Mesa%20Up-Down%202010-2011-2012.pdf>.

Espaciomarketing. *Comparación de Tecnologías de Corte Térmico Mecanizado de Máquinas y Herramientas* [en línea], 2014. [Consulta: 4 mayo 2018]. Disponible en: <http://www.demaquinasyherramientas.com/soldadura/comparacion-de-tecnologias-de-corte-termico-mecanizado>.

ESPINO NUÑEZ, Arturo. *Control de Temperatura con Lógica Difusa para un Sistema de Entropía Láser.* [En línea]. (tesis) (pregrado)Universidad Nacional Autónoma de México 2017.[Consulta: 16 abril 2018]. Disponible en: <http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/bitstream/handle/132.248.52.100/12293/TESIS.pdf?sequence=1>.

Espitia, Helbert.; Soriano, José. "Diseño y Simulación de un Controlador Difuso de Temperatura Empleando el Concreto Basado en Relaciones Booleanas". *SciELO Revista chilena de Ingeniería.* [en línea], 2011. pp. 12. Disponible en: <http://www.scielo.org.co/pdf/tecn/v16n32/v16n32a03.pdf>.

Ferreira, A.; Fuentes, R. "Estudio Comparativo entre Control PID y Difuso". *EEEI*, 2015. Fuente de Poder 12V-20ª. *Datos Técnicos.* [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <https://afel.cl/producto/fuente-de-poder-12v-20a-240w/>.

Gabinete. *Conceptos*. [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <http://www.keyperconlat.com/gabinetetableroparaelcontroldeellaskeyper.html>.

Gestión Operación e Investigación. *Cálculo de la Raíz del Error Cuadrático Medio o RMSE (Root Mean Squared Error)*. [blog], 2015. [Consulta: 16 octubre 2018]. Disponible en: <https://www.gestiondeoperaciones.net/proyeccion-de-demanda/calculo-de-la-raiz-del-error-cuadratico-medio-o-rmse-root-mean-squared-error/>.

García, R; et al. "Diseño de una Estrategia de Control Difuso Aplicada al Proceso de Ultracongelación de Alimentos". *SciELO Revista chilena de ingeniería* [en línea], 2017. vol. 25, no. 1, pp. 70-84. ISSN 0718-3305. DOI 10.4067/S0718-33052017000100070. Disponible en: https://scielo.conicyt.cl/scielo.php?pid=S0718-33052017000100070&script=sci_arttext&tlng=en#aff6

Gómez, E. *Introducción al filtrado digital* [en línea], 2010. Disponible en: <http://www.dtic.upf.edu/~egomez/teaching/sintesi/SPS1/Tema7-FiltrosDigitales.pdf>.

Gómez, C. *Lógica Difusa. Técnicas de Softcomputing* [en línea], 2015. pp. 29. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: http://www.esi.uclm.es/www/cglez/downloads/docencia/2011_Softcomputing/LogicaDifusa.pdf

GUSQUE, U & FERNÁNDEZ, V. Control de Temperatura Mediante Lógica Difusa, del Terrario Ubicado en el Museo de Historia Natural. [en línea], (tesis) (posgrado) Escuela Politécnica Nacional, Ecuador 2016, [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <http://bibdigital.epn.edu.ec/handle/15000/15032>.

Hernández, H. *La Lógica Difusa Características Y Aplicaciones*. [en línea], 2015. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <http://www.ilustrados.com/documentos/logica-difusa-caracteristicas-aplicaciones-050208>.

Márquez, J. *Procesamiento y Análisis de Señales e Imágenes*. [en línea], 2016. Disponible en: http://www.academicos.ccadet.unam.mx/jorge.marquez/cursos/imagenes_neurobiomed/Mediana_filtro.pdf.

MARTÍNEZ, V. Control Difuso de un Sistema de Refrigeración para el Hogar [en línea]. (tesis)(pregrado) Universidad Aquino Bolivia 2010. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: http://virtual.udabol.edu.bo/pluginfile.php/185985/mod_resource/content/1/CONTROLDIFUSO.pdf.

Megalaser. *Tubo laser Co2 sellado Megalaser®* [en línea], 2016. [Consulta: 27 marzo 2018]. Disponible en: <http://megalaser.com.ar/insumos-y-repuestos/tubo-laser-co2-sellado/>.

Módulo Sensor Temperatura MAX6675. *Termopar Tipo K. Electronilab* [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <https://electronilab.co/tienda/modulo-sensor-temperatura-max6675-termopar-tipo-k-spi/>.

MURILLO, C. & GUZMÁN, J. Diseño e Implementación de un Control Difuso para una Estación Didáctica de Temperatura. [en línea]. (tesis) (pregrado) Universidad Tecnológica de Pereira, Perú 2014. [Consulta: 27 marzo 2018]. Disponible en: <http://repositorio.utp.edu.co/dspace/bitstream/handle/11059/5640/623853G993.pdf;sequence=1>.

Ogatha, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna 5ed.* [en línea], 2010. pp.23. Disponible en: <https://hellsingge.files.wordpress.com/2014/10/ingenieria-de-control-moderna-ogata-5ed.pdf>.

Ogatha, Katsuhiko. *Ingeniería de Control Moderna Modulo II.* [en línea], 2016. pp.6. Disponible en: <https://hellsingge.files.wordpress.com/2014/10/ingenieria-de-control-moderna-ogata-5ed.pdf>.

Ponce, P. *Inteligencia artificial con Aplicaciones a la Ingeniería* [en línea], 2010. Disponible en: <https://lelinopontes.files.wordpress.com/2014/09/inteligencia-artificial-con-aplicaciones-a-la-ingenieria3ada.pdf>.

Quiminet. *Sistemas de enfriamiento del agua.* [en línea], 2018. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <https://www.quiminet.com/articulos/sistemas-de-enfriamiento-del-agua-2560810.htm>.

Rabuñal, A & Serantes, S. *Sistemas de Control Automático.* [en línea]. Universidad de Coruña, España 2006. Disponible en: ftp://ceres.udc.es/master_en_ingenieria_del_agua/master%20antiguo_antes%20del%202012/Primer_Curso/Tecnicas_Experimentales_en_Hidraulica/Instrumentacion/apuntes_master.pdf.

Radiadores ACC. *Datos Técnicos.* [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <https://radiadoresacc.com/#nuestrosproductos>.

Redacción. *"Sabes cómo funciona y para qué sirve el sistema de enfriamiento que tiene el motor de tu moto". Revista Motor* [en línea], 2018. [Consulta: 16 octubre 2018]. Disponible en: https://revistamoto.com/wp_rm/sabes-como-funciona-y-para-que-sirve-el-sistema-de-enfriamiento-que-tiene-el-motor-de-tu-moto/.

RODRÍGUEZ, R. & DAZA, P. Estudio y Diseño de un Controlador Difuso Implementado en un Módulo Basado en Microcontroladores. [en línea], (tesis) (pregrado) Universidad Católica de Santiago de Guayaquil, Ecuador 2016.[Consulta: 14 abril 2018]. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/5341>.

Sensor de Flujo., *Datos Técnicos*. [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <https://tienda.bricogEEK.com/otros/936-sensor-de-flujo-yf-s201.html>.

Timg. *Lista de Tubos de CNC Laser Eje de Co2*. [en línea], 2016. 2016. Disponible en: <https://soporte.timg.cl/support/solutions/articles/92513-lista-de-tubos-de-cnc-laser-eje-de-co2->.

TAVERA, A. Control Difuso de Temperatura Microcontroladores. [en línea], (tesis)(pregrado) Universidad de Antioquia Medellín, Colombia 2005. [Consulta: 27 marzo 2018]. Disponible en: <http://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/140/1/ControlDifusoDeTemperaturaMicrocontroladores.pdf>.

Tubo de Láser de CO2 de 100W. *Datos Técnicos*. [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: <http://shcdf.com/en/display.asp?id=683>.

Vam Industry. *Instrumentación y Control*. [en línea], 2016. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: https://ddd.uab.cat/pub/tfg/2016/148700/TFG_VamIndustry_v03.pdf.

Users Staff. *ELECTRÓNICA, 2014: Conceptos básicos y diseño de circuitos: USERS*. ISBN 978-987-1949-54-0, 2014, pp. 43-44.

Valdivia, S. *Control de Temperatura de una Habitación Mediante Lógica Difusa*. [en línea], 2014. [Consulta: 28 marzo 2018]. Disponible en: <http://v-beta.urp.edu.pe/pdf/id/5799/n/control-de-temperatura-de-una-habitacion-mediante-logica-difusa>.

Ventilador. *Datos Técnicos*. [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018]. Disponible en: https://www.autozone.com.mx/enfriamiento-calefaccion-y-control-del-clima/ventilador-del-radiador-ensamble/dorman-ventilador-del-radiador-ensamble/538959_125074_0.

Villalba, K. *Diseño de control difuso de temperatura para protección de motores DC utilizando tarjeta de adquisición de datos DAQ y Software LabView* .[en línea], 2017. Disponible en: <http://repositorio.ucsg.edu.ec/handle/3317/9080>.

Zaragoza, J.; Cuevas, J. "Control Difuso PD+I TAKAGI-SUGENO-KANG para un Sistema de Aire Acondicionado". *Pistas Educativas*. [en línea], 2017. pp. 408. Disponible en: <http://www.itcelaya.edu.mx/ojs/index.php/pistas/article/viewFile/1014/869>

Zumbadores Piezocerámicos., «Buzzers». [en línea], 2018. [Consulta: 14 octubre 2018].
Disponible en: <https://www.electrodh.com/catalogo/ver-item.action?id=18086&d=1>.

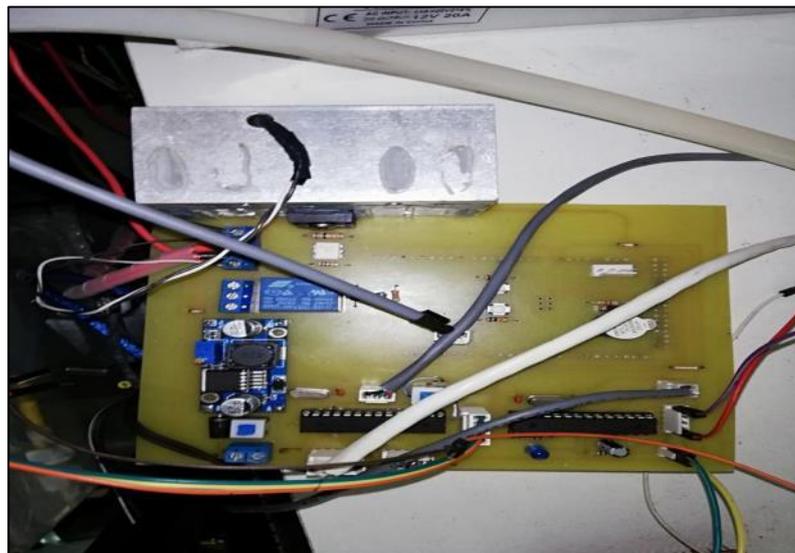
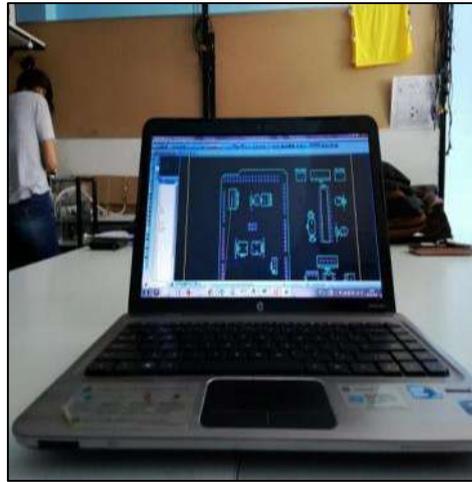
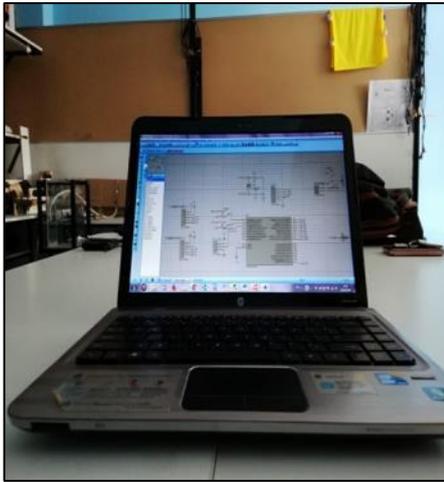
Anexo B: Desarrollo de la estructura del sistema difuso.



Anexo C: Comprobación de los elementos utilizados.



Anexo D: Realización de la placa de control



Anexo E: Montaje del sistema

