



# **UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**

## **FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

### **CARRERA DE INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**

#### **PROPUESTA TECNOLÓGICA**

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA UN  
PROCESO DE TEMPERATURA EN LOS LABORATORIOS DE LA  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**

Proyecto de Propuesta Tecnológica presentado previo a la obtención del Título de  
Ingeniero Eléctrico.

**Autores:**

Quinga Tonato Bryan Anibal

Toala Hidalgo Kevin Alberto

**Tutor Académico:**

Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc

**LATACUNGA - ECUADOR**

**2025**

## DECLARACIÓN DE AUDITORÍA

Nosotros, Quinga Tonato Bryan Anibal y Toala Hidalgo Kevin Alberto, declaramos ser autores de la presente propuesta tecnológica: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA EN LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, siendo el Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc. tutor del presente trabajo; y eximimos expresamente a la Universidad Técnica de Cotopaxi y a sus representantes legales de posibles reclamos o acciones legales.

Además, certificamos que las ideas, conceptos, procedimientos y resultados vertidos en el presente trabajo Tecnológico, son de nuestra exclusiva responsabilidad.



Quinga Tonato Bryan Anibal

C.I. 050388828-1



Toala Hidalgo Kevin Alberto

C.I. 085012079-1

## **AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN**

En calidad de Tutor de la siguiente propuesta tecnológica sobre el título:

**“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA EN LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, de los ponentes: Quinga Tonato Bryan Anibal y Toala Hidalgo Kevin Alberto de la Carrera de **INGENIERÍA EN ELECTRICIDAD**, considero que dicho informe tecnológico cumple con los requisitos metodológicos y aportes científicos-técnicos suficientes para ser sometidos a la evaluación del Tribunal de Validación de Proyectos que el Consejo Directivo de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas de la Universidad Técnica de Cotopaxi designe, para su correspondiente estudio y calificación.

Latacunga, febrero del 2025

  
.....  
Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc.  
C.I.050234776-8

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN

En calidad de Tribunal de Lectores, aprueban el presente Informe de Investigación de acuerdo a las disposiciones reglamentarias emitidas por la Universidad Técnica de Cotopaxi, y por la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas; por cuanto, los postulantes: Quinga Tonato Bryan Anibal y Toala Hidalgo Kevin Alberto con el título de Proyecto de Titulación: **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA EN LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de sustentación de Proyecto.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, febrero del 2025

Para constancia firman



Lector 1 (Presidente)

Ing. León Segovia Marco Anibal M.Sc.


C.I. 050230540-2



Lector 2

Ing. León Segovia Manuel Ángel M.Sc.

C.I. 050204135-3



Lector 3

Ing. Castillo Fiallos Jessica Nataly M.Sc.

C.I. 060459021-6

## AVAL DE IMPLEMENTACIÓN

Latacunga, febrero del 2025

Ing. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa  
**Analista de Laboratorio de CIYA**

Presente. –

En calidad de Analista de Laboratorio de la Universidad Técnica De Cotopaxi, confirmo la realización del proyecto, **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA EN LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI”**, implementado por los señores estudiantes de la Universidad Técnica de Cotopaxi, carrera de Ingeniería en Electricidad; Quinga Tonato Bryan Anibal con CI: 050388828-1 y Toala Hidalgo Kevin Alberto con CI: 085012079-1.

Es cuanto puedo certificar en honor a la verdad, se expide el presente para el interesado pueda hacer uso para los fines que crea conveniente.

Atentamente,



Ing. Luis Eduardo Hinojosa Guanoluisa  
C.I. 0502365810  
Analista de Laboratorio de CIYA

## **AGRADECIMIENTO**

*Agradezco, en primera instancia a Dios por brindarme sus bendiciones e inspirarme en los momentos difíciles durante esta gran etapa.*

*A mi madre **Martha Piedad Tonato Ramón** por el apoyo que me ha brindado durante mi periodo universitario. Sus formas de motivarme a seguir adelante fueron las que me trajeron hasta este punto. A mis hermanos, los cuales a pesar de ser hogares aparte siempre estuvieron ahí para brindarme su apoyo incondicional.*

*A mis compañeros y amigos **Kevin T., Alexis C, Damián S., Jhordy V., Alex Ch. y Francisco Ll.**, quienes compartieron conmigo esta gran etapa de mi vida.*

*Agradecer también a todos los docentes que formaron parte de mi formación académica con sus enseñanzas y consejos, los mismos que me sirvieron para formarme como un profesional honesto y capaz, así también al **Ingeniero Byron Paúl Corrales** por su guía y paciencia en este proceso.*

*Muchas Gracias a todos y a todas.*

**Quinga Tonato Bryan Anibal**

***DEDICATORIA***

*Quiero dedicar este trabajo de titulación a mi madre Martha, por todo el sacrificio y apoyo incondicional que me ha brindado durante mi formación profesional. Su cariño y amabilidad me han brindado la fuerza para seguir adelante sin importar los obstáculos.*

***Quinga Tonato Bryan Anibal***

## **AGRADECIMIENTO**

*En primer lugar, agradezco a Dios, quien ha guiado cada uno de mis pasos en este camino de formación, su presencia constante me ha brindado la fuerza, la sabiduría y la perseverancia necesarias para enfrentar los desafíos de esta carrera.*

*Quiero agradecer a mi madre y a mi abuela, **Johana Hidalgo, Ligia Rodríguez,** quienes, con su amor incondicional, sacrificio y valores inculcados, han sido mi pilar en los momentos más difíciles.*

*A mis hermanos y primos, por su compañía, su comprensión y por ser siempre un motivo de inspiración, especialmente a mi **Tío Carlos** por su confianza y enseñanza en todo este tiempo gracias por enseñarme a ser unos de los mejores.*

*A mi tutor de este Trabajo de Titulación el **Ing. Paul Corrales,** por su dedicación, guía experta y paciencia han sido invaluable en la realización de este proyecto.*

*A mis compañeros de camino más que eso mis hermanos **Alexis C, Alexis S, Bryan Q., Cristian P., Jhordy V. y Jordy L.,** gracias por compartir conmigo este viaje.*

*A **Samantha,** mi agradecimiento eterno por ser mi guía y apoyo en estos meses, dándome la fuerza para seguir adelante.*

*Finalmente, quiero agradecer a todas aquellas personas que, de manera directa o indirecta, contribuyeron al desarrollo de este proyecto.*

*A todos ustedes, mi gratitud eterna. Sin su apoyo, esta meta no hubiera sido posible.*

*Este logro no es solo mío, sino de todos ustedes. ¡Gracias!*

**Toala Hidalgo Kevin Alberto**

## **DEDICATORIA**

*Dedico esta tesis, en primer lugar, a Dios,  
por ser la fuente de mi fortaleza y guía en cada paso de este camino.*

*A Él, que ha sembrado en mí la vocación de ingeniero eléctrico,  
le agradezco por iluminar mi mente y mi corazón  
en la búsqueda del conocimiento y por darme  
la capacidad de superar cada obstáculo con fe y determinación.*

*A mi madre y a mi abuela, **Johana Hidalgo, Ligia Rodríguez**  
por su inagotable amor, apoyo y sacrificio.  
Ustedes han sido mi sustento incondicional,  
inspirándome a perseverar y a superar cada  
desafío con valor, inteligencia y determinación.*

*Gracias por creer en mí, por animarme cuando más lo necesitaba  
y por estar a mi lado en cada paso de este recorrido.  
Este logro es tanto suyo como mío, y se lo dedico con todo mi corazón.*

*Finalmente, dedico este trabajo a toda mi familia  
**Toala Hidalgo**, cuya presencia y apoyo han sido  
fundamentales en mi vida. A ustedes, por su amor,  
comprensión y constante motivación, les dedico  
este logro con todo mi agradecimiento y cariño.*

*Dedico este Trabajo de Titulación a los que  
me apoyaron desde el inicio hasta el final agradecido de corazón*

**Toala Hidalgo Kevin Alberto**



## **AVAL DE TRADUCCIÓN**

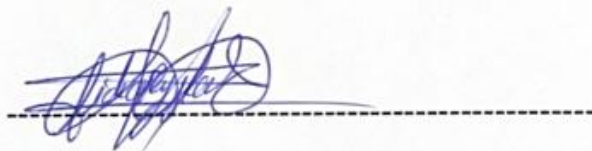
En calidad de Docente del Idioma Inglés del Centro de Idiomas de la Universidad Técnica de Cotopaxi; en forma legal **CERTIFICO** que:

La traducción del resumen al idioma Inglés del proyecto tecnológico cuyo título versa **“IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA EN LOS LABORATORIOS DE LA UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.”** presentado por: **Quinga Tonato Bryan Anibal y Toala Hidalgo Kevin Alberto** egresados de la Carrera de: **Ingeniería en Electricidad**, perteneciente a la **Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas**, lo realizaron bajo mi supervisión y cumple con una correcta estructura gramatical del Idioma.

Es todo cuanto puedo certificar en honor a la verdad y autorizo a los peticionarios hacer uso del presente aval para los fines académicos legales.

Latacunga, 18 de febrero del 2025

Atentamente,



Mg. Lidia Rebeca Yugla Lema  
**DOCENTE CENTRO DE IDIOMAS-UTC**  
**CI: 0502652340**



**CENTRO  
DE IDIOMAS**

ÍNDICE GENERAL

DECLARACIÓN DE AUDITORÍA .....	II
AVAL DEL TUTOR DE PROYECTO DE TITULACIÓN .....	III
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE TITULACIÓN.....	IV
AVAL DE IMPLEMENTACIÓN.....	V
AGRADECIMIENTO .....	VI
DEDICATORIA.....	VII
AGRADECIMIENTO .....	VIII
DEDICATORIA.....	IX
ÍNDICE GENERAL .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XIV
ÍNDICE DE TABLAS.....	XVI
1. INFORMACIÓN GENERAL.....	1
2. INTRODUCCIÓN.....	1
2.1. EL PROBLEMA.....	1
2.1.1. Situación problemática .....	1
2.1.2. Formulación del problema.....	2
2.2. OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN.....	2
2.2.1. Objeto: .....	2
2.2.2. Campo de acción para el proyecto:.....	2
2.3. BENEFICIARIOS .....	2
2.3.1. Beneficiarios directos. ....	2
2.3.2. Beneficiarios indirectos. ....	2
2.4. JUSTIFICACIÓN .....	3
2.5. OBJETIVOS.....	3
2.5.1. General.....	3
2.5.2. Específicos.....	3
2.6. TAREAS POR OBJETIVO. ....	4
3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA .....	4

3.1.	ANTECEDENTES .....	4
3.2.	PROCESOS DE TEMPERATURA .....	7
3.3.	SISTEMAS DE CONTROL .....	7
3.3.1.	Control PID.....	7
3.3.2.	Control Difuso .....	10
3.3.3.	Control predictivo (MPC).....	13
3.4.	SISTEMAS DE MEDICIÓN .....	15
3.4.1.	Sensores de temperatura .....	15
3.4.2.	Acondicionamiento de sensores .....	18
3.4.3.	Lógica difusa. ....	23
4.	MATERIALES Y MÉTODOS.....	30
4.1.	DECLARACIÓN DE VARIABLES .....	30
4.2.	DISEÑO DEL HORNO DE TEMPERATURA .....	30
4.2.1.	Parámetros de diseño .....	30
4.2.2.	Dimensionamiento de la estructura del horno .....	31
4.3.	TÉCNICAS E INSTRUMENTOS.....	32
4.3.1.	Arduino Uno .....	33
4.3.2.	Arduino Mega.....	33
4.3.3.	AC Dimmer Module.....	34
4.3.4.	Transmisor de temperatura PT100 Tipo a 4-20mA.....	35
4.3.5.	MAX31865 Módulo amplificador del sensor de temperatura.....	36
4.3.6.	PT100 con cabezal de aluminio.....	37
4.3.7.	Resistencia tubular.....	38
4.3.8.	Ventilador Axial .....	38
4.3.9.	Pantalla Nextion Programable .....	39
4.4.	DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL .....	40
4.4.1.	Sistema de control para la carga mediante módulo Dimmer.....	40
4.4.2.	Control Fuzzy para la obtención de todas las variables de temperatura.....	41
4.4.3.	Configuración del Módulo amplificador del sensor de temperatura MAX31865 .....	49
4.4.4.	Configuración del Transmisor de temperatura para RTD-PT100 .....	50
4.4.5.	Sistema Nextion.....	50
5.	ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	53
5.1.	MÓDULO DE HORNOS DE TEMPERATURA.....	53

5.2.	PRUEBA DEL CONTROL FUZZY DE TEMPERATURA Y SUS VARIANTES CON SISTEMA MAX31865.....	54
5.3.	PRUEBA DEL CONTROL FUZZY DE TEMPERATURA TRASMISOR RTD-PT100.....	57
5.4.	COMPARACIÓN DEL CONTROL FUZZY DE TEMPERATURA CON TRASMISOR SITRANS Y SENSOR MAX31865 .....	58
5.5.	COMPARACIÓN DEL CONTROL FUZZY Y CONTROL PID .....	59
6.	CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES .....	61
6.1.	CONCLUSIONES.....	61
6.2.	RECOMENDACIONES .....	62
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	63

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Diagrama de bloque de un proceso de control PID [10].	8
Figura 2. Controlador Difuso [12].	11
Figura 3. Control Predictivo pasado, presente y futuro [13].	13
Figura 4. Tipos de sensores de temperatura [14].	16
Figura 5. Curva de control de fase de voltaje [16].	20
Figura 6. Triodo para corriente alterna-Triac [17].	20
Figura 7. Conexión RTD a 2 hilos [17].	22
Figura 8. Conexión RTD a 3 hilos [17].	23
Figura 9. Conexión RTD a 4 hilos [17].	23
Figura 10. Conjunto Difuso [18].	24
Figura 11. Conjunto Clásico [18].	25
Figura 12. Función de pertenencia clásica [19].	25
Figura 13. Función de pertenencia difusa [19].	26
Figura 14. Características de función de pertenencia difusa [19].	27
Figura 15. Función de pertenencia $\Gamma$ [19].	27
Figura 16. Función de pertenencia L [19].	28
Figura 17. Función de pertenencia $\Lambda$ [19].	28
Figura 18. Función de pertenencia $\Pi$ [19].	29
Figura 19. Conjunto difuso con tres funciones de pertenencia [19].	29
Figura 20. Máquina de inferencia difusa [19].	30
Figura 21. Diseño en 3D del horno.	31
Figura 22. Estructura metálica del horno.	31
Figura 23. Placa de Arduino Uno [20].	33
Figura 24. Placa Arduino Mega [22].	34
Figura 25. Módulo Dimmer [23].	35
Figura 26. Transmisor de Temperatura RTD-PT100 [24].	36
Figura 27. MAX31865 [24].	36
Figura 28. RTD PT-100 y Termocupla tipo “K”	38
Figura 29. Resistencia Tubular 1000W-120V	38
Figura 30. Ventilador Axial 110V [27].	39
Figura 31. Pantalla Nextion Programable 5 pulgadas [28].	40
Figura 32. Circuito de control de la carga resistiva.	40

Figura 33. Diagrama de flujos de la programación del módulo Dimmer.....	41
Figura 34. Función de membresía para la temperatura .....	44
Figura 35. Función de pertenencia para el error. ....	45
Figura 36. Función de membresía para la resistencia.....	46
Figura 37. Función de membresía para la velocidad del ventilador.....	48
Figura 38. Flujograma de la lógica de programación. ....	49
Figura 39. Conexión de Transmisor de temperatura .....	50
Figura 40. Interfaz de Inicio en software Nextion.....	52
Figura 41. Datos obtenidos de Programación y conexión Nextion. ....	52
Figura 42. Respuestas gráficas a través del tiempo. ....	53
Figura 43. Panel frontal sistema Nextion. ....	54
Figura 44. Comportamiento de las Variables con un Setpoint de 40°C.....	55
Figura 45. Respuesta del sistema de control con un setpoint 40°C.....	56
Figura 46. Comportamiento de la variable temperatura para un setpoint 40°C .....	57
Figura 47. Comparación de PV Termocupla-PT100.....	59
Figura 48. Comparación de PV Fuzzy-PID.....	60

**ÍNDICE DE TABLAS**

Tabla 1: Comparación con Otros Métodos.....	15
Tabla 2. Características del Tol Galvanizado.....	32
Tabla 3: Tabla de especificaciones del vidrio. ....	32
Tabla 4. Conjuntos de membresía para la temperatura .....	43
Tabla 5. Conjuntos de membresía para el error.....	44
Tabla 6. Conjuntos de membresía para la Resistencia. ....	45
Tabla 7. Conjuntos de membresía para el ventilador axial.....	47
Tabla 8. Reportes de las variables mediante el sensor PT100 con setpoint de 40 °C .....	71
Tabla 9. Reportes de las variables mediante la termocupla tipo “K” con setpoint de 40 °C.....	75
Tabla 10: Reportes de las variables con setpoint de 40 °C con control PID. ....	79

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE  
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS**

**TITULO: “IMPLEMENTACIÓN DE UN SISTEMA DE CONTROL DIFUSO  
PARA UN PROCESO DE TEMPERATURA EN LOS LABORATORIOS DE LA  
UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI.”**

**Autores:** Quinga Tonato Bryan Anibal

Toala Hidalgo Kevin Alberto

**RESUMEN**

El control de procesos temperatura ha ganado importancia en la actualidad, impulsado diferentes tipos de control. La integración de máquinas y dispositivos tecnológicos, apoyados en software especializado, permite implementar diversos procesos productivos. Por esta razón se ha evaluado un manejo de proceso de temperatura puntual, el mismo que permitirá evaluar de mejor manera las imprecisiones y variabilidad en los datos de entrada, así como también el hecho de modificar reglas lingüísticas es menos complejo que cambiar ecuaciones complejas. Es así como mediante la propuesta tecnológica de implementar un sistema de control difuso de temperatura en un horno mediante conocimiento de funciones de pertenencia y programación en Arduino se busca familiarizarse con los procesos de control industrial y el seguimiento de variables que intervienen en los controles que utilizan lógica difusa.

Por tal motivo se realizó la construcción de dos hornos, los mismos que cumplen funciones por separado, los cuales tienen como elemento calefactor una resistencia tubular de 1000 W, además de dos sensores de temperatura, los cuales son: RTD-PT100 y Termocupla tipo “K” respectivamente, por otra parte, consta de dos módulos previamente programados en el software Arduino, los mismos que se encargan de realizar el control difuso, además de un sistema Nextion para la visualización de las variables. Por lo tanto, se concretó un sistema fuzzy, el cual establece un cambio de 10°C en un promedio de 8 minutos con el sensor RTD-PT100 y 10 minutos con la Termocupla tipo “K”, todo esto mientras pasa de 30°C a 40°.

**Palabras clave:** Implementación, Control, Difuso, Procesos Industriales.

**TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI**

**ENGINEERING AND APPLIED SCIENCES SCHOOL**

**TITLE: "IMPLEMENTATION OF A FUZZY CONTROL SYSTEM TO A TEMPERATURE PROCESS AT THE TECHNICAL UNIVERSITY OF COTOPAXI LABORATORIES."**

**Authors:** Quinga Tonato Bryan Anibal

Toala Hidalgo Kevin Alberto

**ABSTRACT**

Nowadays, the control of industrial processes has gained great importance, driven by the growing advances in automation. The machines integration and technological devices, supported by specialized software, allows for the optimization and implementation of various production processes. For this reason, a punctual temperature process control has been evaluated, which will allow for a better assessment of inaccuracies and variability in input data. Additionally, modifying linguistic rules is less complex than changing complex equations.

Thus, through the technological proposal of implementing a fuzzy temperature control system in a furnace, utilizing membership functions knowledge and Arduino programming, the aim is to become familiar with industrial control processes and the monitoring of variables involved in fuzzy logic-based controls.

For this purpose, two furnaces were built, each performing separate functions. These furnaces have a 1000 W tubular resistance as the heating element, along with two temperature sensors: an RTD-PT100 and a Type "K" thermocouple. Additionally, the system includes two pre-programmed modules in Arduino software, responsible for executing the fuzzy control, as well as a Nextion system for variable visualization. Consequently, a fuzzy system was implemented, achieving a temperature change of 10°C in an average of 8 minutes using the RTD-PT100 sensor and 10 minutes with the Type "K" thermocouple, transitioning from 30°C to 40°C.

**Keywords:** Implementation, Control, Fuzzy, Industrial Processes.

## 1. INFORMACIÓN GENERAL

**Título:** Implementación de un sistema de control difuso para un proceso de temperatura en los laboratorios de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

**Fecha de inicio:** Abril del 2024

**Fecha de finalización:** Febrero del 2025

**Lugar de ejecución:** Barrio El Ejido, Av. Simón Rodríguez, Parroquia San Felipe, Ciudad de Latacunga, Cantón Latacunga, Provincia de Cotopaxi.

**Facultad:** Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA)

**Carrera:** Ingeniería en Electricidad.

**Proyecto de investigación vinculado:** Implementación de un sistema SCADA para el control de temperatura de dos hornos a través de una red Ethernet.

**Docente tutor:** Ing. Byron Paúl Corrales Bastidas M.Sc.

**Área de Conocimiento:** 07 ingeniería, Industria y Construcción / 071 Ingeniería y Profesiones Afines / 0714 Electrónica y Automatización.

**Línea de Investigación:** Procesos Industriales

**Sublíneas de investigación:** Automatización, control y protecciones de sistemas electromecánicos.

## 2. INTRODUCCIÓN

### 2.1. EL PROBLEMA

Como consecuencia de la variabilidad que se tiene al obtener datos de entrada en los procesos de temperatura y a la incertidumbre que manejan estos, se presenta la necesidad de implementar diferentes tipos de sistemas de control, es por eso que se opta por llevar a cabo un control difuso, el cual, utiliza algoritmos matemáticos avanzados para analizar valores de entrada analógicos en términos de variables lógicas difusas, las cuales pueden asumir cualquier valor continuo entre 0 y 1.

#### 2.1.1. Situación problemática

En los procesos industriales donde la temperatura es una variable crítica, se presentan desafíos debido a la variabilidad en los datos de entrada y la incertidumbre inherente a los sistemas térmicos. Factores como las fluctuaciones ambientales, las diferencias en los materiales y las

imprecisiones en los sensores pueden afectar el rendimiento de los sistemas de control tradicionales, como el PID, que requieren modelos matemáticos precisos para su ajuste óptimo. Dado este escenario, se plantea implementar un sistema de control flexible y adaptable que pueda gestionar la incertidumbre de manera eficiente. En este contexto, el control difuso se presenta como una alternativa viable, ya que emplea algoritmos matemáticos avanzados para procesar valores de entrada analógicos mediante variables lógicas difusas, las cuales pueden asumir cualquier valor continuo entre 0 y 1.

Sin embargo, la aplicación de este tipo de control en entornos industriales plantea ciertos desafíos, como la selección adecuada de funciones de pertenencia, la definición de reglas lingüísticas óptimas y la evaluación del desempeño del sistema en comparación con métodos de control convencionales.

### **2.1.2. Formulación del problema**

Para el control de procesos de temperatura se evidencia varias limitantes debido a la incertidumbre que generan los parámetros extraídos, esto impide una implementación efectiva de tecnologías de control que puedan procesar de manera eficiente los parámetros analizados en estos procesos.

## **2.2.OBJETO Y CAMPO DE ACCIÓN**

### **2.2.1. Objeto:**

Control difuso para un proceso de temperatura.

### **2.2.2. Campo de acción para el proyecto:**

3311Tecnología de la instrumentación / 331101 Tecnología de Automatización.

## **2.3.BENEFICIARIOS**

### **2.3.1. Beneficiarios directos.**

La incorporación del sistema difuso para un proceso de temperatura en un horno dotara tanto a los alumnos como profesores de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería y Aplicadas (CIYA), una herramienta para la comprensión de la temperatura a través de lógica difusa. Será posible realizar prácticas de laboratorio con el propósito de fomentar el progreso del conocimiento en el campo de la ingeniería.

### **2.3.2. Beneficiarios indirectos.**

Los beneficiarios indirectos de la implementación del sistema de control a través de lógica

difusa incluyen a la comunidad científica, así como a profesionales e investigadores en el campo de la automatización y el control de procesos industriales, los mismos que obtendrán una herramienta practica para la instrucción de procesos de temperatura que son más versátiles al momento de manejar la incertidumbre, también presentan mejor adaptabilidad y flexibilidad lo cual facilita ajustes en el sistema..

## **2.4.JUSTIFICACIÓN**

La integración de un sistema de control difuso para la regulación de temperatura en un horno utilizando en prácticas académicas es una solución importante para mejorar la formación de futuros ingenieros eléctricos. Actualmente, muchos estudiantes enfrentan dificultades en el manejo de sistemas avanzados entorno a la medición y control de variables de temperatura, lo que limita su preparación para el entorno industrial. Implementar este tipo de control en las prácticas de los laboratorios permite mejorar el manejo de la incertidumbre de los datos generados en un proceso de temperatura basado en un horno. Además, facilita la comparación de resultados con modelos de control diferentes como lo es el control PID u otros, fortaleciendo el aprendizaje práctico. Un sistema de control difuso no solo optimiza los procesos térmicos, sino que también aumenta la competitividad de los estudiantes, debido a la flexibilidad y el mejor desempeño en sistemas no lineales, es decir aquellos donde la relación entre variables cambia con el tiempo. En general, esta implementación fomenta la aplicación de diferentes tecnologías de control industrial en el ámbito de la ingeniería eléctrica o de alguna otra de las ingenierías que rige la facultad de CIYA de la Universidad Técnica de Cotopaxi.

## **2.5.OBJETIVOS.**

### **2.5.1. General**

- Implementar un sistema de control para un proceso de temperatura a través de la aplicación de un proceso basado en lógica difusa.

### **2.5.2. Específicos**

- Analizar los procesos térmicos y los sistemas difuso, incluyendo sus características y funcionalidades.
- Especificar todos los componentes necesarios para el diseño y control automático de un horno de temperatura.
- Implementar un sistema de control de temperatura utilizando técnicas de control difuso.

**2.6. TAREAS POR OBJETIVO.**

<b>Objetivos específicos</b>	<b>Actividades (tareas)</b>	<b>Resultados esperados</b>	<b>Técnicas, Medios e Instrumentos</b>
<b>Implementar un sistema de control para un proceso de temperatura a través de la aplicación de un proceso basado en lógica difusa.</b>	-Investigación de la dinámica de los procesos de temperatura con un sistema de control difuso.  -Estimación de los alcances del sistema difuso.	-Compresión de los procesos térmicos, funcionalidades y atributos de los sistemas difuso	-Mediante metodología investigativa.  - Revisión bibliográfica de tesis, libros y artículos científicos.
<b>Especificar todos los componentes necesarios para el diseño y control automático de un horno de temperatura.</b>	- Adquisición los materiales y elementos necesarios para el desarrollo del sistema de control de temperatura a través del sistema fuzzy.  - Comprensión de los Parámetros de Operación de Estos Componentes.	-Fijar los parámetros operativos y funcionales de los componentes para el ajuste óptimo del módulo en cada horno.	-A través de la revisión investigativa y el análisis de las fichas técnicas de los elementos utilizados, las mismas que vienen establecidas por cada fabricante.
<b>Implementar un sistema de control de temperatura utilizando técnicas de control difuso</b>	-Programación del sistema difuso con el lenguaje establecido de Arduino.	-Elaboración de interfaz de usuario para el manejo de las variables a modular a través de NEXTION.	-Software Arduino IDE.

**3. FUNDAMENTACIÓN TEÓRICA**

**3.1. ANTECEDENTES**

En el contexto de los procesos térmicos en hornos especializados, la dinámica de la temperatura puede ser altamente no lineal y estar sujeta a variaciones y perturbaciones externas. Los sistemas de control difuso son particularmente efectivos en estos escenarios, ya que pueden adaptarse mejor a las incertidumbres y proporcionar un control más preciso y estable. Un controlador difuso se basa en reglas heurísticas y conocimiento experto, que se traducen en funciones de pertenencia y reglas de inferencia difusas para tomar decisiones de control.

La investigación de Castaño S., Hernández D. y Gallo H. en relación con la supervisión y el control de la temperatura de un horno de curado de prendas índigo (ropa teñida con tinte índigo o color azul), empleando lógica difusa y reguladores PI, estas requieren someterlas a condiciones específicas de temperatura dentro de un horno para asegurar su acabado adecuado. En este estudio se implementó un controlador basado en lógica difusa y un controlador PI mediante el método de ganancia límite, demostrando las ventajas de estos controladores alternativos en la regulación de variables industriales [1].

En la Universidad Politécnica Salesiana, cuyo trabajo fue realizado por, Diego Hernando Hidalgo Llumiquinga bajo el tema “Desarrollo de un controlador inteligente difuso para el control de temperatura de moldes de plástico con sistema de colada caliente, monitoreada de forma remota desde la nube con herramientas IoT” en el año 2021, este trabajo diseña un sistema Industria 4.0 para el control remoto y análisis de datos de resistencias eléctricas en moldes de colada caliente, usando un PLC Siemens S7-1200 y un Siemens Simatic IoT2040 el cual implementa un controlador difuso en lugar de PID, mejorando la respuesta del sistema [2]. De igual forma, en la Universidad Técnica de Ambato, se encontró el trabajo realizado por, Richard Eduardo Sailema Medina bajo el tema “Sistema de control basado en el método de lógica difusa para optimizar el funcionamiento de un horno eléctrico utilizado en el proceso de ensuelado para la fabricación artesanal de calzado” en el año 2020, donde se implementó un controlador basado en lógica difusa para ajustar la temperatura del horno y coordinar el tiempo de calentamiento de las suelas, esto optimizó el proceso, evitando desperdicios y quemaduras de las suelas por lo cual se redujo el tiempo de reactivación de las suelas en un 70%, mejorando la competitividad de la empresa [3].

En la Escuela Colombiana de Carreras Industriales (ECCI), se encontró el trabajo de titulación desarrollado por, Agámez Raúl y Rojas Daniel con el tema “Diseño e implementación de un sistema de control difuso de temperatura automatizado por procesamiento de imagen aplicado al cultivo del hongo pleurotus ostreatus (orellana)” en el año 2014, donde se emplea la tecnología de "OPEN SOFTWARE" y "OPEN HARDWARE" de Arduino para desarrollar aplicaciones prácticas, utilizando procesamiento de imagen y ajustes en el código para controlar la temperatura de hornos industriales [4].

Por otra parte, en la Universidad de Ingeniería y Tecnología (UTEC), se encontró el trabajo de Postgrado con el tema, “Diseño e implementación de controladores basados en lógica difusa para una planta de procesos multipropósito” en el año 2022; realizado por José Luis Pampamallco Jara, por otro lado la tesis compara controladores PID y difusos en procesos

industriales, los PID, utilizados en el 90% de los casos, destacan en términos de caudal y presión por su velocidad de respuesta y precisión en cambio los controladores difusos, basados en lógica humana, superan a los PID en procesos de nivel y temperatura, mostrando un tiempo de estabilización más corto, error de estado estable y exceso en el control descentralizado [5].

En la Universidad Técnica de Ambato, cuyo trabajo fue realizado por, Cristhian Fernando Monta Toapanta bajo el tema “Sistema de control difuso y monitoreo para granjas avícolas utilizando suelo radiante con energía solar” en el año 2020, el sistema de monitoreo utiliza servidores gratuitos, proporcionando interfaces accesibles sin costos adicionales, pero con dificultades de diseño ya que el control difuso simula a un operador humano usando reglas Si-Entonces para controlar variables además, la energía solar del Ecuador se utiliza para calefacción, creando un ambiente óptimo para la cría de aves [6].

De igual forma, en la Universidad técnica de Ambato, se encontró el trabajo realizado por, David Enrique Rosales Manzo bajo el tema “Sistema difuso takagi-sugeno para monitoreo de humedad y temperatura de cultivos de plátano” en el año 2020, donde el sistema difuso utiliza la humedad relativa y la temperatura ambiental como variables de entrada para evaluar el riesgo de Sigatoka negra en plantaciones de plátano, tomando en cuenta las condiciones óptimas para esta enfermedad las cuales son una humedad relativa mayor al 80% y una temperatura entre 23°C y 28°C [7].

En la Universidad Técnica Del Norte, se encontró el trabajo de titulación desarrollado por, Leandro Joel Salazar Cárdenas con el tema “Diseño de un sistema de riego inteligente para cultivos de hortalizas basado en fuzzy logic en la granja la pradera de la universidad técnica del norte” en el año 2019, donde el proyecto desarrolla un sistema de riego inteligente basado en lógica difusa para cultivos de hortalizas en Granja La Pradera Utilizando factores ambientales como entradas y tiempo de riego como salida, gestionados a través de una interfaz gráfica automatizada por lo cual las pruebas han demostrado ahorros significativos en comparación con el riego por goteo manual [8].

Por otra parte, en la Universidad Nacional de Colombia, se encontró una revista científica con el tema, “Control de Temperatura Utilizando Lógica Difusa” en el año 2010; realizado por José Luis C. Palacio Gómez y J. García Sucerquia, por otro este trabajo presenta el diseño e implementación de un control de temperatura utilizando lógica difusa como herramienta de apoyo a la decisión en el cual la temperatura se fija entre 30 y 100 grados centígrados gracias a un microcontrolador PIC 16F877A el cual forma el corazón del sistema, conectado a una PC para monitorear y ajustar la temperatura en tiempo real [9].

### **3.2.PROCESOS DE TEMPERATURA**

Se refieren a las técnicas y métodos utilizados para controlar, medir y mantener la temperatura en sistemas o procesos industriales, científicos o de otro tipo. Algunos de los principales procesos de temperatura incluyen:

- Calefacción.
- Refrigeración.
- Control de Temperatura en Procesos Industriales.
- Control Térmico en Reactores Químicos.
- Temperatura en el Tratamiento de Materiales.
- Procesos de Enfriamiento y Calefacción en Electrónica.
- Control de Temperatura en Alimentos.
- Control de Temperatura en Laboratorios.
- Control de Temperatura Ambiental.

Sin embargo, el más importante debido a sus aplicaciones en la ingeniería es el control de temperatura en procesos industriales siendo este aspecto fundamental en la automatización y optimización de operaciones dentro de diferentes industrias, como la manufactura, la química, la alimentaria, la farmacéutica, entre otras. Consiste en la regulación y mantenimiento de la temperatura dentro de un rango específico para asegurar que los procesos productivos se desarrollen de manera eficiente, segura y con productos de alta calidad. Este tipo de control es crucial debido a que muchas reacciones químicas, transformaciones físicas y propiedades de los materiales dependen directamente de la temperatura, y cualquier desviación significativa puede alterar los resultados, disminuir la eficiencia, generar pérdidas económicas, e incluso comprometer la seguridad.

### **3.3. SISTEMAS DE CONTROL**

#### **3.3.1. Control PID**

Los controladores PID (proporcional-integral-derivativo) son elementos esenciales en los sistemas modernos de automatización y control. Funcionan mediante un mecanismo de retroalimentación en un bucle cerrado, ajustando constantemente las salidas según la diferencia entre el valor medido y el punto de ajuste establecido [10].

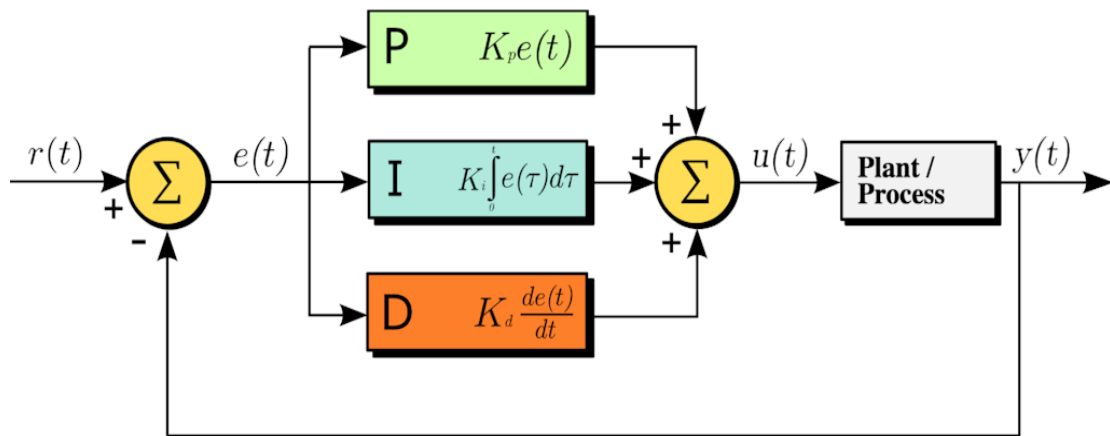


Figura 1. Diagrama de bloque de un proceso de control PID [10].

### 3.3.1.1. Características del control PID

El control PID es una de las estrategias más empleadas en sistemas de control por su eficiencia y facilidad de implementación, sus características principales son:

Componentes del Control PID

- Control Proporcional (P):
  - Responde proporcionalmente al error (diferencia entre el valor deseado y el valor real).
  - Mejora la velocidad de respuesta y reduce el error inicial.
  - Puede introducir un error estacionario si se utiliza solo.
  - Ganancia proporcional  $K_p$  ajusta la intensidad de la acción proporcional.
- Control Integral (I):
  - Acumula el error en el tiempo y lo corrige.
  - Reduce el error estacionario a cero.
  - Puede causar oscilaciones si no se ajusta adecuadamente.
  - Ganancia integral  $K_i$  ajusta la acción correctiva integral.
- Control Derivativo (D):
  - Acumula el error en el tiempo y lo corrige.
  - Responde al cambio en la tasa del error.
  - Mejora la estabilidad y disminuye las oscilaciones.
  - Ayuda a anticipar cambios y ajustar el control antes de que el error sea grande.
  - Ganancia derivativa  $K_d$  ajusta la acción correctiva derivativa.

### 3.3.1.2. Principio de funcionamiento del control PID

El principio de funcionamiento de un controlador PID en hornos de temperatura se basa en ajustar la potencia de calentamiento del horno de manera que se alcance y mantenga la

temperatura deseada con precisión y estabilidad [10].

Funcionamiento General en un Horno de Temperatura

- Medición de la Temperatura Actual:
  - Un sensor, como un termopar o un RTD (Resistance Temperature Detector), mide la temperatura dentro del horno.
  - Esta temperatura medida  $T_m$  se envía al controlador PID.
- Cálculo del Error:
  - El controlador PID compara la temperatura medida  $T_m$  con la temperatura deseada  $T_d$ .
  - Se calcula el error mediante la Ecuación (1)

$$e(t) = T_d - T_m \quad (1)$$

- Cálculo de la Acción de Control:
  - El controlador PID usa el error  $e(t)$  para calcular la potencia de salida  $u(t)$  en función de los tres términos:
    - Proporcional (P): Ajusta la potencia en proporción al error.
    - Integral (I): Compensa errores acumulados para eliminar desviaciones a largo plazo.
    - Derivativo (D): Suaviza los cambios abruptos al predecir la tendencia del error.

La salida del PID se calcula mediante la Ecuación (2) :

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2)$$

- Aplicación de la Potencia de Calentamiento:
  - La salida del controlador  $u(t)$  regula el elemento calefactor del horno, como resistencias eléctricas o quemadores, ajustando la potencia para aumentar o disminuir la temperatura.

- Realimentación:
  - El sistema mide continuamente la temperatura y ajusta la potencia de calentamiento para mantenerla cercana a la consigna.

#### **3.3.1.3. Ventajas del control PID**

- Permite mantener la temperatura muy cerca del valor deseado (consigna), ideal para procesos que requieren control preciso, como la metalurgia, horneado o tratamientos térmicos [11].
- Reduce las fluctuaciones de temperatura al compensar cambios en el entorno o en la carga del horno [11].
- Gracias al término integral (I), el controlador PID puede llevar el error estacionario a cero, asegurando que se alcance la temperatura deseada [11].
- Responde automáticamente a perturbaciones externas, como aperturas de la puerta del horno o variaciones en el suministro eléctrico [11].
- Al minimizar el tiempo para alcanzar la consigna y evitar oscilaciones, reduce el consumo innecesario de energía [11].

#### **3.3.1.4. Desventajas del control PID**

- Ajustar las ganancias ( $K_p, K_i, K_d$ ) puede ser complicado y requiere experiencia o pruebas exhaustivas ya que una mala configuración puede causar inestabilidad o respuestas lentas.
- Los hornos suelen tener una gran inercia térmica (retardo en la respuesta), lo que puede dificultar el ajuste del controlador PID [11].
- Una sintonización inadecuada puede provocar oscilaciones alrededor de la consigna, afectando la calidad del proceso [11].
- El ruido o las variaciones en los sensores de temperatura pueden afectar negativamente el término derivativo (D), lo que podría causar fluctuaciones en la salida [11].
- Debido a la inercia térmica de los hornos, el PID puede tardar en estabilizarse, especialmente en sistemas grandes [11].

#### **3.3.2. Control Difuso**

El control difuso es una técnica basada en la lógica difusa, que utiliza reglas heurísticas para imitar el razonamiento humano en la toma de decisiones. En hornos de temperatura, este método es especialmente útil para manejar sistemas no lineales, con incertidumbre o difíciles de

modelar con precisión [12].

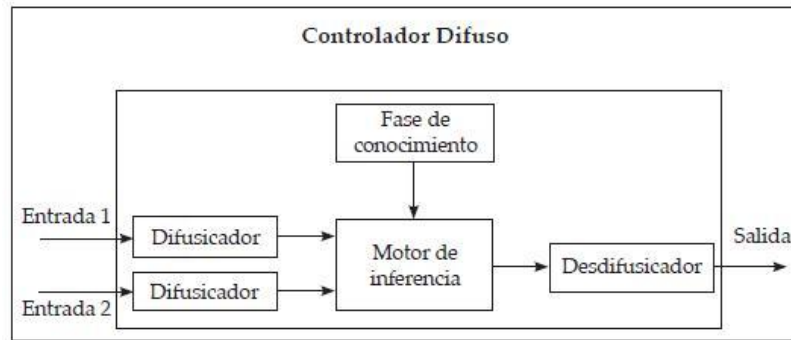


Figura 2. Controlador Difuso [12].

### 3.3.2.1. Características del Control Difuso en Hornos

- Basado en Conocimiento Experto: En lugar de usar ecuaciones matemáticas complejas, utiliza reglas simples basadas en el conocimiento de operadores o expertos en el proceso [12].
- Lógica Difusa: Trabaja con conceptos imprecisos (como "temperatura alta" o "error pequeño") y los convierte en acciones de control [12].
- Simplicidad en el Diseño: No requiere un modelo matemático exacto del horno, lo que lo hace adecuado para sistemas donde las dinámicas son difíciles de modelar [12].

### 3.3.2.2. Funcionamiento del Control Difuso

- Definición de Entradas y Salidas:
  - Las entradas típicas incluyen:
    - Error de temperatura ( $T_d - T_m$ ).
    - Cambio en el error ( $\Delta e$ ): Variación del error en el tiempo.
  - La salida es la acción de control, como el ajuste de la potencia del calefactor.
- Fuzzificación:
  - Convierte las entradas precisas (números) en conjuntos difusos con etiquetas lingüísticas, por ejemplo:
    - Error: {Pequeño, Medio, Grande}.
    - Cambio de error: {Negativo, Cero, Positivo}.
- Base de Reglas:

- Se definen reglas del tipo "Si-Entonces" para relacionar las entradas con la salida, por ejemplo:
  - Si el error es grande y el cambio de error es positivo, entonces aumentar la potencia significativamente.
  - Si el error es pequeño y el cambio de error es negativo, entonces reducir la potencia ligeramente.
- Inferencia Difusa:
  - Combina las reglas para determinar la acción de control adecuada según las condiciones actuales.
- Desfuzzificación:
  - Convierte el resultado difuso en un valor preciso que se aplica al sistema (por ejemplo, un porcentaje de potencia).

#### **3.3.2.3.Ventajas del Control Difuso**

- Funciona bien en sistemas no lineales o con incertidumbre, como hornos con inercia térmica elevada.
- Basado en reglas heurísticas, reduce la necesidad de desarrollar un modelo complejo del sistema.
- Maneja cambios en el entorno o en las propiedades del horno de manera intuitiva.
- Es fácil de entender e implementar para operadores familiarizados con el proceso.
- Es menos sensible a variaciones pequeñas en las mediciones del sensor.

#### **3.3.2.4.Desventajas del Control Difuso**

- La calidad del control depende de la definición correcta de las reglas, lo que requiere experiencia o datos históricos.
- A medida que aumenta el número de entradas y salidas, el sistema de reglas puede volverse complejo y difícil de gestionar.
- En sistemas con dinámica lenta, como algunos hornos, puede no ser tan preciso como un PID o un control predictivo bien ajustado.
- No garantiza una solución óptima en términos matemáticos, lo que puede resultar en un desempeño subóptimo en algunos casos.

### 3.3.3. Control predictivo (MPC)

El Control Predictivo (MPC) aplicado a hornos de temperatura permite un manejo preciso y eficiente de la temperatura, incluso en sistemas con inercia térmica elevada, retardos significativos o restricciones físicas. Esta técnica optimiza el rendimiento del horno anticipándose al comportamiento futuro del sistema y ajustando las acciones de control en tiempo real [13].

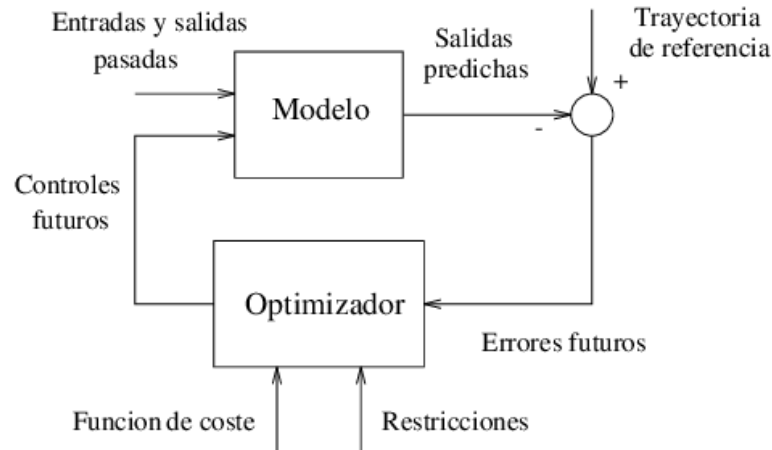


Figura 3. Control Predictivo pasado, presente y futuro [13].

#### 3.3.3.1. Características del Control Predictivo en Hornos

- **Predicción del Comportamiento Térmico:** Utiliza un modelo matemático que describe la dinámica térmica del horno para predecir cómo la temperatura cambiará en el futuro [13].
- **Optimización de la Energía:** Calcula las acciones de control necesarias para alcanzar y mantener la temperatura deseada mientras minimiza el uso de energía [13].
- **Manejo de Restricciones:** Integra restricciones como límites en la potencia de calentamiento, temperaturas máximas de seguridad y tiempos de operación [13].
- **Control Multivariable:** Puede gestionar sistemas con múltiples zonas de calentamiento o variables interdependientes [13].

#### 3.3.3.2. Funcionamiento del MPC en Hornos

- **Desarrollo del Modelo del Horno:** Se crea un modelo matemático que describe el comportamiento térmico del horno, considerando:
  - Inercia térmica.
  - Retardos (tiempo que tarda en responder a una acción).

- Transferencia de calor (conducción, convección o radiación).
- Predicción del Futuro: Basándose en el estado actual del horno (temperatura medida) y las acciones de control previas, predice la evolución futura de la temperatura durante un horizonte de predicción definido (NN) [13].
- Optimización: Resuelve un problema de optimización para encontrar la combinación de acciones de control (potencia del elemento calefactor) que minimicen el error con respecto a la consigna y cumplan las restricciones como se aprecia en la Ecuación (3):

$$J = \sum_{k=0}^N (T_d - T_m(k))^2 + \lambda \sum_{k=0}^N (u(k))^2 \quad (3)$$

Donde:

$T_d$ : temperatura deseada,

$T_m(k)$ : temperatura predicha,

$u(k)$ : es la potencia aplicada

$\lambda$ : pondera el costo energético.

- Aplicación de Control: Solo se aplica la primera acción de control calculada (potencia del calefactor) y el proceso se repite en el siguiente paso de tiempo.

### 3.3.3.3. Ventajas del MPC

- Mantiene la temperatura cerca del setpoint, incluso en presencia de perturbaciones como cambios en la carga térmica o apertura del horno.
- Minimiza el consumo de energía al evitar sobrecalentamientos o correcciones innecesarias.
- Integra límites de seguridad, como evitar temperaturas críticas que podrían dañar materiales o componentes.
- Es ideal para hornos con inercia térmica significativa, ya que predice el impacto de las acciones actuales en el futuro.
- Ajusta automáticamente las acciones de control en función de las mediciones actuales y posibles perturbaciones.

### 3.3.3.4. Desventajas del MPC

- Resolver el problema de optimización en tiempo real requiere mayor capacidad de procesamiento, especialmente en hornos grandes o rápidos.

- La efectividad del control depende de la precisión del modelo térmico del horno ya que los modelos inexactos pueden degradar el rendimiento.
- Requiere conocimientos avanzados para desarrollar e implementar el modelo y el algoritmo de control.
- Los sistemas MPC pueden ser más costosos de instalar y configurar en comparación con controladores como PID.

La Tabla 1 detalla ciertos aspectos comparativos entre el control PID, predictivo y difuso.

Tabla 1: Comparación con Otros Métodos.

Aspecto	Control PID	Control Predictivo (MPC)	Control Difuso
<b>Modelo del Sistema</b>	No requiere modelo explícito	Necesita un modelo matemático	No requiere modelo
<b>Manejo de Restricciones</b>	Limitado	Excelente	Básico
<b>Complejidad Computacional</b>	Baja	Alta	Media
<b>Precisión</b>	Alta en sistemas lineales	Alta en sistemas no lineales	Moderada, depende de las reglas
<b>Escalabilidad</b>	Fácil	Compleja en sistemas grandes	Difícil para muchas variables

### 3.4.SISTEMAS DE MEDICIÓN

Es un conjunto de dispositivos y procesos diseñados para detectar, registrar y controlar la temperatura en un entorno determinado. Dependiendo del uso, puede ser simple o complejo.

#### 3.4.1. Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura son dispositivos eléctricos y electrónicos diseñados para medir la temperatura a través de señales eléctricas específicas. Estas señales pueden transmitirse de forma directa o mediante la variación de la resistencia eléctrica también conocidos como sensores térmicos, detectores de calor o sondas térmicas, estos dispositivos tienen aplicaciones variadas, como el control de circuitos electrónicos debido a su capacidad para monitorear y detectar cambios en la temperatura esto los hace esenciales en una amplia gama de sistemas y procesos industriales [14].



Figura 4. Tipos de sensores de temperatura [14]

### Sensores de Temperatura Basados en Cambios de Resistencia u Otras Propiedades Físicas

Los sensores de temperatura funcionan midiendo cambios en propiedades físicas, como la resistencia, para detectar variaciones de temperatura. Existen diferentes tipos y materiales que ofrecen soluciones específicas según el rango de medición y la aplicación [14].

#### 3.4.1.1. Sensores de Resistencia

- Termistores PTC (Coeficiente de Temperatura Positivo): Incrementan su resistencia a medida que la temperatura sube [14].
- Termistores NTC (Coeficiente de Temperatura Negativo): Disminuyen su resistencia con el aumento de la temperatura, aprovechando óxidos metálicos o semiconductores [14].

Dependiendo de los materiales, se distinguen resistencias basadas en:

- Platino: Alta precisión y estabilidad en un amplio rango de temperaturas.
- Silicio: Rentables y versátiles.
- Cerámica: Adecuadas para altas temperaturas, usadas también como elementos calefactores o termofusibles.

#### Otros Sensores Basados en Propiedades Físicas

- Sensores de Cuarzo Oscilante: Utilizan cambios en la frecuencia de resonancia para medir con alta exactitud.
- Materiales Piroeléctricos: Reaccionan a cambios de temperatura mediante variaciones en la densidad de carga, generando una polarización espontánea.
- Pirómetros: Detectan radiación térmica, ideales para aplicaciones sin contacto.

- Interruptores Bimetálicos: Funcionan mecánicamente. Un bimetálico se curva con el calor, activando un interruptor.
- Sensores Ferromagnéticos: Utilizan un imán permanente que se adhiere o libera en función de la temperatura, activando un conmutador.
- Sensores de Fibra Óptica: Miden perfiles de temperatura mediante fibras de vidrio, utilizando el efecto Raman.

#### **3.4.1.2. Sensores con Señales Eléctricas Directamente Procesables**

Estos sensores, basados en semiconductores o circuitos de estado sólido, generan señales eléctricas que se procesan sin necesidad de conversión adicional dependiendo de su diseño pueden producir:

- Corriente eléctrica.
- Tensión eléctrica.
- Señales digitales.

Es así como detallamos los materiales detectados por sensores de temperatura, además de las ventajas y desventajas de los mismos.

El tipo de material que un sensor puede medir depende de su diseño, por ejemplo:

- Sensores de resistencia: Aptos para metales como platino, níquel o cobre.
- Otros sensores (como piroeléctricos o de fibra óptica): Adaptables a diferentes materiales y aplicaciones.

Ventajas:

- Alta precisión en la medición.
- Adaptabilidad a diferentes aplicaciones y materiales.
- Disponibles en diversos diseños para ambientes específicos.

Desventajas:

- Elección compleja del tipo adecuado según el rango de temperatura y las condiciones ambientales.
- Algunos sensores requieren un conocimiento avanzado para integrarse eficazmente.
- Pueden surgir efectos secundarios, como el calentamiento en sensores de resistencia.

- Es fundamental garantizar componentes de alta calidad y tecnologías sofisticadas para evitar errores de medición.

### **3.4.2. Acondicionamiento de sensores**

El acondicionamiento de sensores es un proceso fundamental para adaptar y optimizar las señales generadas por un sensor, haciéndolas adecuadas para su análisis o procesamiento posterior. Este procedimiento incluye varias etapas, como la amplificación, filtrado, conversión y estabilización de la señal, con el objetivo de asegurar mediciones precisas y confiables [15]. Se refiere a la transformación de la señal eléctrica producida por un sensor para que sea compatible con los sistemas de adquisición de datos o control. Este acondicionamiento aborda problemas como señales de baja intensidad, ruido ambiental, fluctuaciones no deseadas o incompatibilidades con el equipo receptor [15].

Elementos Principales del Acondicionamiento

- Amplificación:
  - Incrementa la intensidad de señales débiles, como las de termopares o sensores de resistencia, para que puedan procesarse correctamente.
  - Emplea amplificadores operacionales.
- Filtrado:
  - Elimina interferencias o ruidos no deseados en la señal.
  - Puede utilizar filtros de diferentes tipos, como pasa bajos, pasa altos o pasa banda, dependiendo del requerimiento.
- Conversión:
  - Convierte señales de un formato a otro, como:
    - De analógico a digital mediante convertidores ADC.
    - Variaciones en resistencia a valores de corriente o voltaje.
- Compensación:
  - Corrige errores provocados por factores externos, como temperatura, humedad o no linealidad.
- Aislamiento:

- Protege los circuitos electrónicos de interferencias o corrientes no deseadas, separando eléctricamente el sensor del sistema de acondicionamiento.

#### Métodos de Acondicionamiento Según el Tipo de Sensor

- Sensores de Temperatura:
  - Los termopares necesitan compensación por unión fría y amplificación.
  - Los termistores y RTD requieren circuitos que conviertan los cambios de resistencia en señales de voltaje o corriente.
- Sensores de Presión y Fuerza:
  - Aquellos basados en galgas extensométricas utilizan puentes de Wheatstone y amplificadores para procesar señales de muy baja intensidad.
- Sensores de Movimiento:
  - Los encoders y sensores ópticos requieren la conversión de sus señales digitales para ser interpretados correctamente.
- Sensores de Corriente y Voltaje:
  - Incorporan circuitos diseñados para ajustar las señales a rangos específicos.

#### Ventajas del Acondicionamiento de Sensores

- Mayor Precisión: Minimiza errores en la medición.
- Compatibilidad Ampliada: Permite integrar sensores en diversos sistemas.
- Protección del Sistema: Reduce interferencias y ruidos externos.
- Adaptabilidad: Ajusta las señales para diferentes usos y aplicaciones.

#### **3.4.2.1. Control de fase**

El control de fase, también conocido como control de ángulo de fase, es una técnica utilizada en electrónica de potencia para regular la energía suministrada a dispositivos eléctricos que operan con corriente alterna. Este método permite utilizar únicamente ciertas partes del ciclo de voltaje alterno para generar potencia, lo que resulta en un control eficiente del suministro energético [16].

Para implementar el control de fase, se emplean dispositivos semiconductores controlables, comúnmente denominados válvulas. Estos componentes reciben una señal de activación

retardada tras el punto de conmutación natural del ciclo, momento en el cual se vuelven conductivos. Cuanto mayor sea este retraso, menor será el valor efectivo (RMS) del voltaje de salida y, en consecuencia, menor será la potencia entregada al consumidor [16].

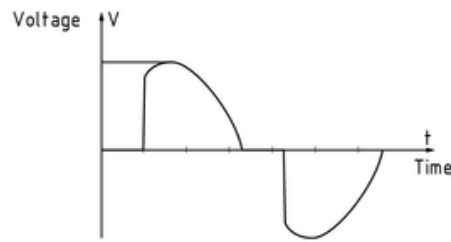


Figura 5. Curva de control de fase de voltaje [16].

### 3.4.2.2. Triodo de corriente alterna (TRIAC)

El TRIAC se activa mediante un pulso de disparo aplicado a su terminal de compuerta. Una vez activado, permite el paso de corriente en ambas polaridades de la señal de AC hasta que el voltaje aplicado alcanza el valor cero. En ese momento, el dispositivo se apaga y bloquea nuevamente el flujo de corriente hasta recibir otro pulso de disparo. Esta característica permite un control preciso y eficiente de la potencia en el circuito [17].

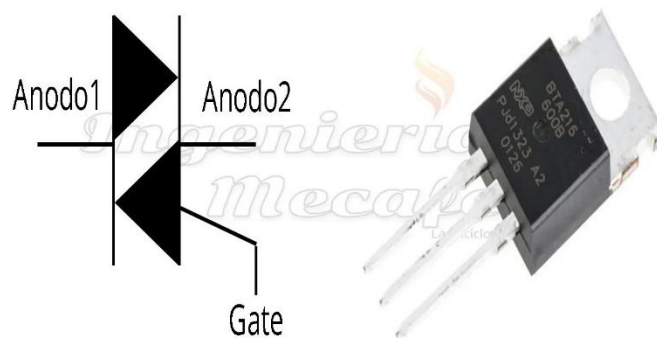


Figura 6. Triodo para corriente alterna-Triac [17].

El TRIAC se emplea en una variedad de aplicaciones de control de potencia, entre las que destacan:

- Controladores de iluminación: Permite ajustar la intensidad de luces incandescentes y sistemas de iluminación LED mediante regulación de fase.
- Control de motores de AC: Facilita la modulación de velocidad en motores pequeños y medianos.
- Regulación de temperatura: Utilizado en dispositivos como calentadores eléctricos o planchas, ajustando la potencia entregada a la resistencia de calefacción.

- Electrodomésticos: Común en ventiladores, aspiradoras y sistemas de calefacción, donde se requiere un control eficiente y preciso de la potencia.

#### Ventajas del TRIAC

- Bidireccionalidad: Puede manejar corriente en ambas direcciones, simplificando el diseño de circuitos de control de AC.
- Eficiencia: Ofrece un control continuo de la potencia desde casi cero hasta el nivel máximo.
- Versatilidad: Compatible con una amplia gama de aplicaciones que requieren regulación de potencia.
- Compacto y económico: Ideal para soluciones donde el espacio y el costo son factores críticos.

#### Desventajas del TRIAC

- Disparo Indeseado: El TRIAC puede ser susceptible a disparos no deseados por interferencias eléctricas.
- Limitaciones de corriente y voltaje: Aunque adecuado para muchas aplicaciones, puede no ser ideal para sistemas de alta potencia sin protección adicional.
- Requiere sincronización: El diseño del circuito debe incluir mecanismos de sincronización con la señal de AC para garantizar un control adecuado.

Con el desarrollo de tecnologías más avanzadas, como el uso de microcontroladores y optoacopladores, el control de TRIAC se ha vuelto más preciso y confiable. Además, su integración con dispositivos inteligentes y sistemas de automatización ha ampliado su uso en domótica e industria [17].

#### **3.4.2.3. Conexión RTD**

Los RTD (Resistance Temperature Detectors) son sensores de temperatura que funcionan midiendo la variación de resistencia eléctrica en respuesta a los cambios de temperatura, estos sensores son ampliamente utilizados en aplicaciones científicas e industriales debido a su alta precisión, estabilidad y rango de operación [17].

Existen varias configuraciones de conexión, como las de 2, 3 y 4 hilos, cada una diseñada para minimizar los errores en función de la aplicación y el entorno.

- Conexión de 2 Hilos

En esta configuración, la resistencia de los cables se suma directamente a la resistencia del sensor, lo que puede generar errores de medición significativos, especialmente en cables largos. Dado que no permite compensar esta resistencia adicional, su uso se limita a aplicaciones donde:

- Precisión baja: Los errores derivados de la resistencia de los conductores no afectan significativamente la aplicación.
- Cables cortos: La longitud del cableado es mínima, reduciendo la resistencia adicional.

Por lo general, se utiliza una manguera de cobre de  $2 \times 0,2 \text{ mm}$ , que agrega una variación de aproximadamente  $0,5 \text{ }^\circ\text{C}$  por metro. Es una opción económica pero limitada para aplicaciones básicas [17].



Figura 7. Conexión RTD a 2 hilos [17].

- Conexión de 3 Hilos

Esta configuración es la más común en aplicaciones industriales debido a su capacidad para compensar la resistencia de los conductores. Los beneficios incluyen:

- Compensación de resistencia: El sistema detecta y corrige la resistencia de los cables, mejorando la precisión.
- Estabilidad ante variaciones: Los cambios en la resistencia de los cables debido a fluctuaciones de temperatura son compensados eficazmente.

Aunque los errores pueden ocurrir si hay diferencias significativas en la resistencia entre los tres cables, sigue siendo una opción confiable para entornos industriales, donde la precisión es esencial pero no crítica.

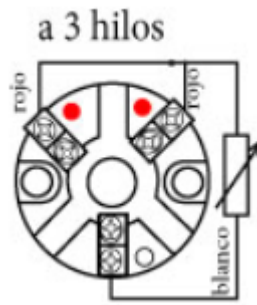


Figura 8. Conexión RTD a 3 hilos [17].

- Conexión de 4 Hilos

Esta configuración es ideal cuando se requiere la máxima precisión, especialmente en sistemas con cables largos o condiciones exigentes. Sus ventajas principales incluyen:

- Alta precisión: Minimiza los errores al eliminar completamente el efecto de la resistencia de los conductores en las lecturas.
- Uso con sensores avanzados: Los RTDs con aislamiento mineral, diseñados para entornos de alta vibración y condiciones adversas, generalmente cuentan con cuatro conductores.

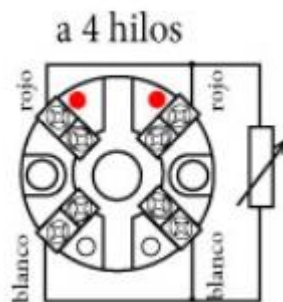


Figura 9. Conexión RTD a 4 hilos [17].

### 3.4.3. Lógica difusa.

Es una técnica de control basada en lógica difusa, diseñada para gestionar la incertidumbre y la imprecisión en sistemas donde no es posible establecer reglas exactas o modelos matemáticos rigurosos [18].

El término "lógica difusa" proviene del término inglés "fuzzy logic", donde la palabra "fuzzy" se interpreta como impreciso, vago o indefinido, en 1965, el ingeniero Lotfi Asker Zadeh presentó la teoría de los conjuntos difusos, a partir de la cual se desarrolló posteriormente la lógica difusa [18].

Hoy en día, esta disciplina matemática es muy utilizada en nuevas tecnologías y sistemas de

control, porque se adapta mejor a la realidad el cual facilita el análisis de datos inexactos utilizando expresiones lingüísticas como "La temperatura exterior es más alta que la temperatura interior" o "El coche circula a gran velocidad", donde la noción de velocidad rápida puede oscilar entre 80 km/h y 120 km/h [18].

El control de lógica difusa funciona formulando reglas para gestionar las respuestas, como: "Si la temperatura de la habitación es alta, enciende el aire acondicionado". Los sistemas inteligentes que utilizan lógica difusa toman variables de entrada a través de un conjunto de reglas, producen uno o más resultados de salida, a diferencia de la lógica tradicional, que determina la pertenencia a un conjunto únicamente por "Verdadero" (1) o "Falso" (0), la lógica difusa permite grados de pertenencia, asignando valores que van de 0 a 1. Mientras que los conjuntos en la lógica tradicional tienen límites claramente definidos, en la lógica difusa estos límites son vagos, por lo tanto, la lógica difusa se considera una extensión de la lógica convencional [18].

#### 3.4.3.1. Conjunto difuso.

Consideremos a  $U$  como un espacio de objetos y a  $u$  como un elemento genérico de  $U$  dentro de un conjunto clásico  $A$ , como se ilustra en la Figura 10. El conjunto de elementos  $u \in U$  se define de manera que cada  $u$  puede pertenecer al conjunto  $A$  ( $u \in A$ ) o no pertenecer ( $u \notin A$ ) a dicho conjunto [18].

La función característica de un conjunto clásico sólo puede tener dos valores: 0 o 1, es decir que su límite de pertenencia está bien definido. A diferencia de los conjuntos clásicos, un conjunto difuso, como se muestra en la Figura 10, expresa el grado de pertenencia de un elemento al conjunto. Por tanto, la función característica de un conjunto difuso puede tener valores entre 0 y 1, lo que indica el grado de pertenencia de un elemento al conjunto dado, es decir, su límite no está estrictamente definido [18].

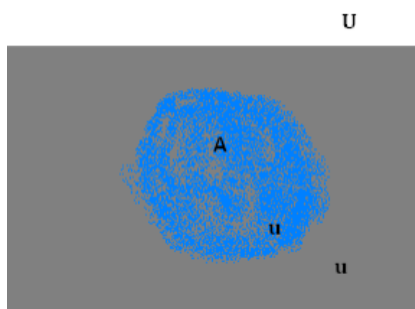


Figura 10. Conjunto Difuso [18].

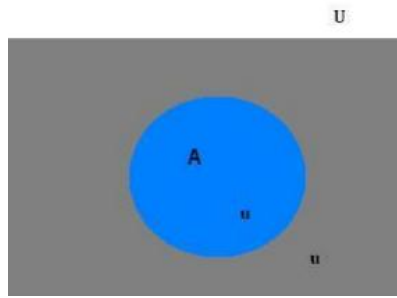


Figura 11. Conjunto Clásico [18].

Se puede definir un conjunto clásico mediante la Ecuación (10):

$$A = \{u | u \in A, U_A = [0,1]\} \quad (4)$$

Donde:

$U_A$ : es la función característica de  $A$  representada en la Ecuación (5).

$$U_A = 0, \text{ si } u \notin A \text{ y } U_A = 1, \text{ si } u \in A \quad (5)$$

En cambio, para poder definir un conjunto difuso se lo puede representar mediante la siguiente ecuación:

$$A = \{(u, \mu(u)) | u \in A, 0 \leq \mu_A(u) \leq 1\} \quad (6)$$

Donde:

$\mu(u)$ : es la pertenencia del elemento hacia el conjunto.

### 3.4.3.2. Función de pertenencia.

La función de pertenencia es la relación que asigna a cada elemento el grado en que forma parte de un conjunto. La Figura 12 muestra gráficamente la función de pertenencia de un conjunto clásico, donde cada elemento está completamente incluido o excluido del conjunto. Por otra parte, la Figura 13 representa gráficamente la función de pertenencia de un conjunto difuso, en la que cada elemento puede pertenecer al conjunto en un grado variable, con valores que van de 0 a 1 [19].

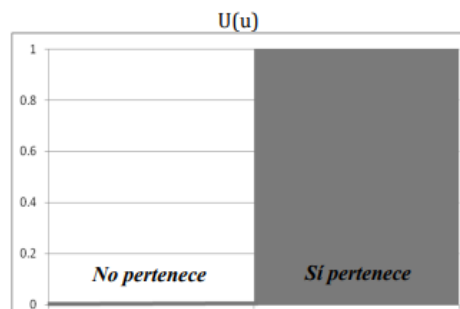


Figura 12. Función de pertenencia clásica [19].

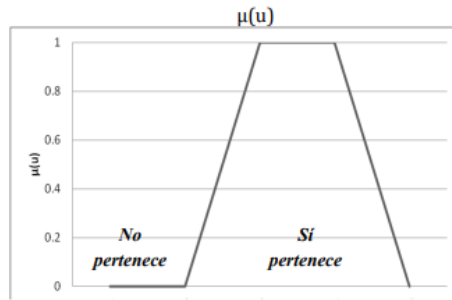


Figura 13. Función de pertenencia difusa [19].

Dado que toda la información de un conjunto de dispersión está contenida en la función de pertenencia, es conveniente establecer términos que la caractericen, una membresía se compone de tres partes esenciales: el núcleo, la base y los límites. Cada sección de la función de membresía difusa se representa gráficamente en la Figura 14 [19].

- Núcleo: Esta es la zona del universo donde los elementos ( $u$ ) del conjunto difuso  $A$  tienen un valor de 1, lo que significa que pertenecen plenamente al conjunto representada en la Ecuación (7):

$$\mu_A(u) = 1 \quad (7)$$

- Base: Es el área del universo donde los elementos ( $u$ ) tienen un valor diferente de cero, lo que indica que pertenecen en algún grado al conjunto difuso representada en la Ecuación (8):

$$\mu_A(u) \neq 0 \quad (8)$$

- Fronteras: Son las áreas del universo donde los elementos tienen un valor diferente de cero, pero no están completamente incluidos en el conjunto, es decir, su grado de pertenencia varía entre 0 y 1 se presenta en la Ecuación (9):

$$0 < \mu_A(u) < 1 \quad (9)$$

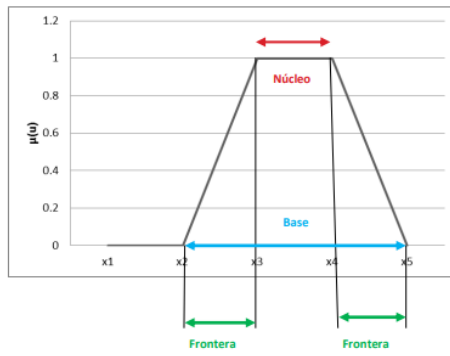


Figura 14. Características de función de pertenencia difusa [19].

### 3.4.3.3. Funciones estándar de pertenencia difusa

Las siguientes funciones, junto con sus gráficos correspondientes, son las más utilizadas para el desarrollo de aplicaciones de control difuso las funciones son las siguientes:

- Función Gamma ( $\Gamma$ ) la cual se muestra en la Figura 15 y su representación matemática mediante la Ecuación (10) [19].

$$\Gamma(u; a, b) = \begin{cases} 0, & \text{si } u < a; \\ \frac{u - a}{b - a}, & \text{si } a \leq u \leq b; \\ 1, & \text{si } u > b. \end{cases} \quad (10)$$

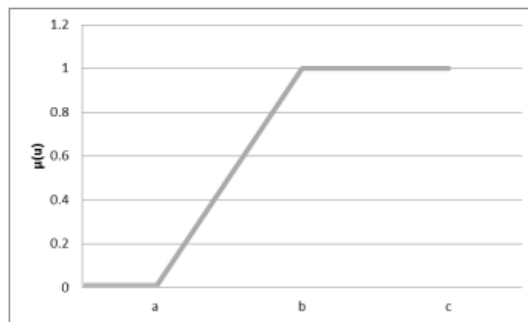


Figura 15. Función de pertenencia  $\Gamma$  [19].

- Función lambda ( $L$ ) se muestra en la Figura 16 y su Ecuación (11) [19].

$$L(u; a, b) = \begin{cases} 1, & \text{si } u < b; \\ \frac{c - u}{c - b}, & \text{si } b \leq u \leq c; \\ 0, & \text{si } u > c. \end{cases} \quad (11)$$

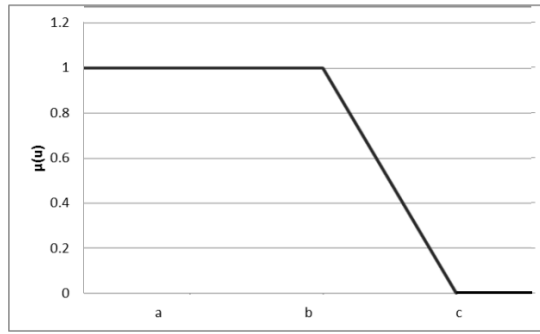


Figura 16. Función de pertenencia L [19].

- Función Triangular ( $\Lambda$ ) la cual se muestra en la Figura 17 y su Ecuación (12) [19].

$$\Lambda(u; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{si } u < a; \\ \frac{u - a}{b - a}, & \text{si } a \leq u \leq b; \\ \frac{c - u}{c - b}, & \text{si } b \leq u \leq c; \\ 0, & \text{si } u > c. \end{cases} \quad (12)$$

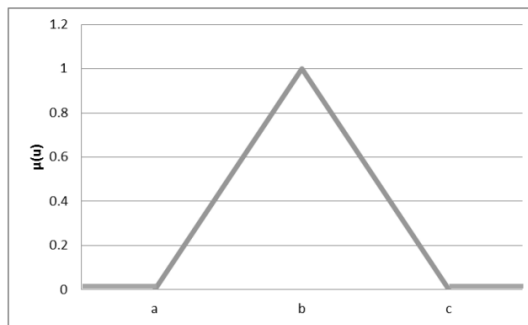
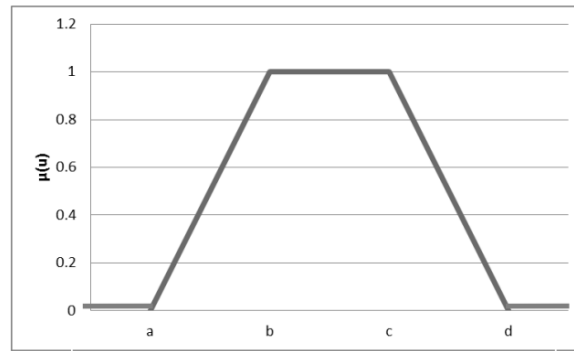


Figura 17. Función de pertenencia  $\Lambda$  [19].

- Función Trapezoidal ( $\Pi$ ) la cual se muestra en la Figura 18 y su Ecuación (13) [19].

$$\Lambda(u; a, b, c) = \begin{cases} 0, & \text{si } u < a; \\ \frac{u - a}{b - a}, & \text{si } a \leq u \leq b; \\ 1, & \text{si } b \leq u \leq c; \\ \frac{d - u}{d - c}, & \text{si } c \leq u \leq d; \\ 0, & \text{si } u > d. \end{cases} \quad (13)$$

Figura 18. Función de pertenencia  $\mu$  [19].

Mediante las funciones mencionadas previamente, se pueden crear conjuntos difusos donde las funciones se cruzan preferiblemente en un nivel de membresía de 0,5, tal como se ilustra en la Figura 19, además, se puede asignar una etiqueta lingüística a cada función de membresía [19].

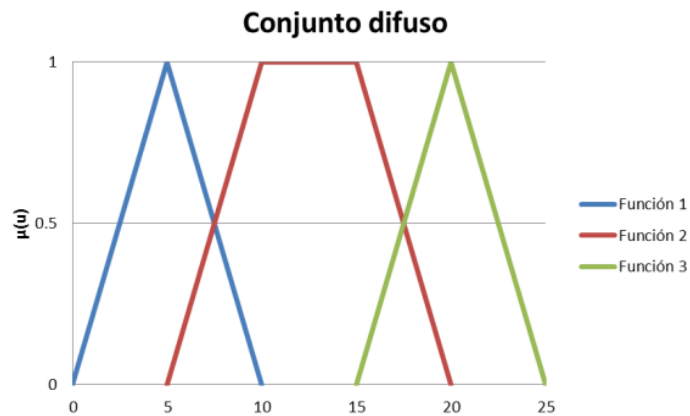


Figura 19. Conjunto difuso con tres funciones de pertenencia [19].

#### 3.4.3.4. Máquina inferencia difusa

La máquina difusa ilustrada en la Figura 20 representa una plataforma informática basada en la teoría de conjuntos difusos, la cual tiene aplicaciones en diversos sectores. Esta tecnología se utiliza en áreas como el control automático, la categorización de datos, los sistemas expertos, la robótica y el reconocimiento de patrones [19].

La máquina de inferencia difusa se compone de tres partes esenciales:

- Difusión.
- Razonamiento o reglas difusas IF-THEN.
- Desdifusión.

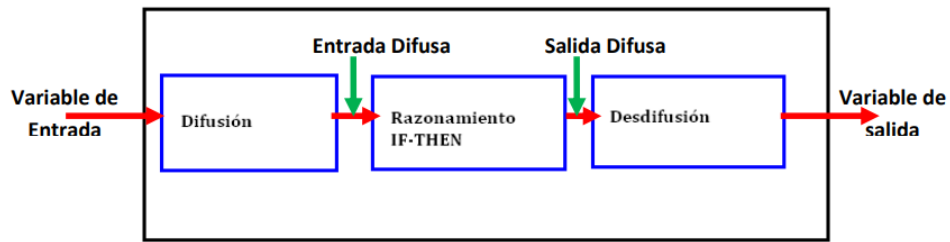


Figura 20. Máquina de inferencia difusa [19].

- **Difusión:** La difusión es el proceso mediante el cual las variables físicas se transforman en entradas difusas, en este proceso, se examinan los valores de las variables y se les asigna un grado de pertenencia a los conjuntos difusos definidos por el diseñador, para realizar esta evaluación, se utilizan las funciones de pertenencia asociadas a los conjuntos difusos [19].
- **Razonamiento:** se encarga de evaluar las reglas definidas por el diseñador, estas reglas vinculan las entradas difusas y producen una salida difusa, conocidas como "reglas difusas" esta salida difusa se transforma en una salida real a través del proceso de desdifusión, lo que permite que el sistema ejecute la acción deseada [19].
- **Desdifusión:** es el proceso de convertir la salida difusa en una variable de salida concreta lo cual significa que el resultado obtenido mediante las reglas de la máquina de inferencia se traduce en una señal física utilizada para controlar el sistema [19].

## 4. MATERIALES Y MÉTODOS

### 4.1. DECLARACIÓN DE VARIABLES

- **Variable Dependiente**

Temperatura.

- **Variable Independiente**

Control difuso.

### 4.2. DISEÑO DEL HORNO DE TEMPERATURA

#### 4.2.1. Parámetros de diseño

Esta sección discutirá el diseño estructural de hornos de temperatura, incluidas sus dimensiones, características y proceso de construcción. Este diseño apunta a su uso en control de temperatura, utilizando un sistema de control Fuzzy y su conexión de una pantalla programable mediante el software de Nextion para su operación.

Para la fabricación del horno, primero se llevó a cabo su diseño en un software de modelado mecánico, donde se desarrolló en 3D la forma que adoptará el horno de temperatura. En la Figura 21, se puede apreciar su estructura cúbica.

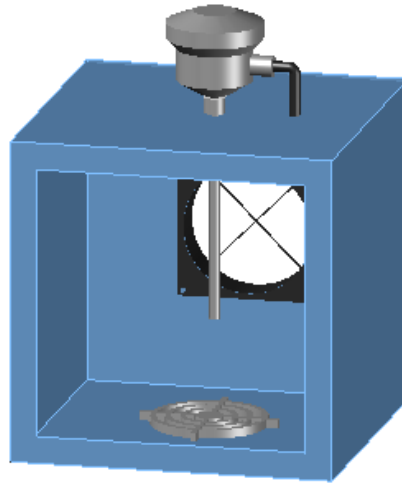


Figura 21. Diseño en 3D del horno.

#### 4.2.2. Dimensionamiento de la estructura del horno

Para la construcción física del cerramiento utilizar las dimensiones especificadas en el diseño 3D. El cuerno tiene una anchura de 30 cm, un ángulo de 30 cm y una altura de 30 cm. Estas medidas definen la superficie total de fabricación de la bocina, como se ilustra en la Figura 22, que muestra su estructura constructiva.



Figura 22. Estructura metálica del horno.

Para la construcción de la estructura de los hornos térmicos se utilizaron láminas de acero galvanizado de una medida de 2 mm de espesor, seleccionadas según la Tabla 2 proporcionada por una industria especializada en la fabricación de acero. Este material fue elegido por su alta dureza y resistencia a la corrosión y al desgaste ambiental.

El acero galvanizado es ideal para la construcción de maquinaria industrial, incluidos hornos, debido a su durabilidad y protección contra la oxidación. En comparación con el hierro y el acero no galvanizado, el acero galvanizado ofrece mayor resistencia y se utiliza ampliamente en la industria de los hornos por sus propiedades superiores.

Tabla 2. Características del Tol Galvanizado.

<b>Dimensión, Pesos nominales</b>				
<b>Espesor</b>		<b>Ancho</b>	<b>Largo</b>	<b>Peso Nominal</b>
<b>Pulg.</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>mm</b>	<b>Kg/plancha</b>
1/40"	0,45	1220	2440	10,52
1/40"	0,5	1220	2440	11,69
1/32"	0,6	1220	2440	14,02
1/32"	0,7	1220	2440	16,36
1/25"	0,9	1220	2440	21,03
<b>1/25"</b>	<b>2</b>	<b>1220</b>	<b>2440</b>	<b>23,37</b>

Además, consta de un vidrio transparente ubicación en la puerta del horno, el mismo que cuenta con las especificaciones detalladas en la Tabla 3 entorno a su grosor y peso aproximado.

Tabla 3: Tabla de especificaciones del vidrio.

<b>Espesor</b>		<b>Peso</b>
<b>Milímetros</b>	<b>Pulgadas</b>	<b>Aproximado</b>
		<b>Kg/m2</b>
<b>6</b>	1/4	15,2

Respecto al diseño y la construcción de la estructura de los hornos de temperatura, es importante resaltar que esta propuesta tecnológica se enfoca principalmente en la automatización de los hornos. La estructura física ha sido cuidadosamente diseñada y construida, pero el foco principal está en integrar sistemas de control avanzados para optimizar su funcionamiento.

### 4.3. TÉCNICAS E INSTRUMENTOS

Esta sección describe los componentes del horno responsables de medir la temperatura en cada dispositivo. Estos sensores recolectan datos de las variables involucradas en la regulación de temperatura, lo que permite su análisis y observación del comportamiento de las variables involucradas en el sistema de control difuso (FUZZY).

### 4.3.1. Arduino Uno

Arduino Uno es una de las placas más populares y utilizadas en la plataforma Arduino, es ideal para principiantes por su sencillez y la gran cantidad de recursos disponibles online, esta placa cuenta con un microcontrolador ATmega328P, funciona a un voltaje de 5V y puede recibir un voltaje de entrada recomendado de 7 – 12 V [20].

Tiene 14 pines entre entrada y salidas digitales, 6 de los cuales se pueden utilizar como salidas PWM y 6 pines de entrada analógica, la corriente CC por pin de entrada/salida es de 20mA, mientras que, para el pin de 3,3V es de 50mA. Además, cuenta con una memoria flash de 32 KB (de los cuales 0,5 KB son utilizados por el gestor de arranque), 2 KB SRAM y 1 KB EEPROM, con una velocidad de reloj de 16 MHz [20].

Sus componentes principales incluyen pines de entradas/salidas digitales que se pueden configurar como entradas o salidas, pines PWM que proporcionan salida de 8 bits y pines de entrada analógica con resolución de 10 bits. La placa también incluye un conector de alimentación para adaptadores AC o baterías, un conector USB para programación y alimentación y un botón de reinicio que permite reiniciar el programa sin desconectar la alimentación [20].

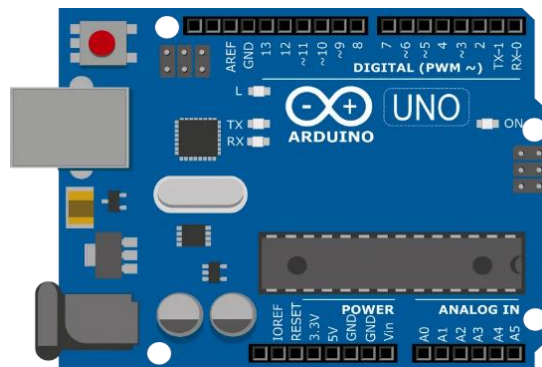


Figura 23. Placa de Arduino Uno [20].

### 4.3.2. Arduino Mega

El Arduino Mega se destaca como uno de los microcontroladores más multifuncionales de la familia Arduino, debido a sus diversas características y capacidades [21]. Entre los elementos que lo hacen particularmente versátil se incluyen:

- **Gran cantidad de pines tanto de entrada como de salida, digitales y analógicas:** Teniendo 54 pines digitales y 16 pines analógicos, Arduino Mega ofrece una gran cantidad de conexiones disponibles para integrar varios componentes electrónicos [21].
- **Amplio rango de voltaje de entrada:** Es capaz de operar con un voltaje de entrada de 7 a 12V, lo que lo hace compatible con diversas fuentes de alimentación [21].

- **Gran capacidad de memoria:** Tiene memoria flash de 256 KB, SRAM de 8 KB y EEPROM de 4 KB, que pueden almacenar y procesar grandes volúmenes de datos [21].
- **Facilidad de comunicación con el ordenador:** La comunicación entre el ordenador y el Arduino Mega se realiza mediante el puerto serie (utilizando el protocolo RS-232). Además, incorpora un conversor USB-serie, permitiendo la conexión directa mediante un cable USB similar al que utilizan las impresoras [21].

Estas características hacen de Arduino Mega una opción robusta y flexible para una amplia gama de proyectos de programación y electrónica.

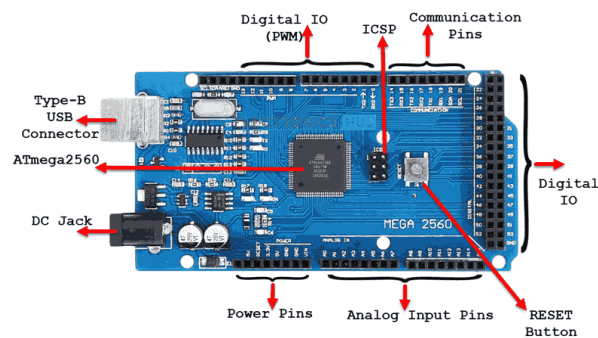


Figura 24. Placa Arduino Mega [22].

#### 4.3.3. AC Dimmer Module

El módulo AC Dimmer facilita el control de cargas de voltaje de CA (220 V CA) utilizando un microcontrolador como Arduino, Pic, Raspberry Pi o ESP8266. A diferencia de un relé, un atenuador de CA ofrece control regulado del voltaje de AC, lo que permite alcanzar voltajes intermedios entre 0 y 220 VAC. Esto permite variar la intensidad de la luz de las bombillas incandescentes, la velocidad de los motores de AC como los ventiladores y la potencia de los calentadores resistivos, entre otras cosas [23].

El dispositivo tiene optoacopladores para proporcionar aislamiento eléctrico entre las etapas de potencia y control. Además, el módulo atenuador puede funcionar como un relé de estado sólido (SSR) para el control de encendido/apagado de cargas de AC [23].

El variador se compone de dos etapas principales: el detector de paso por cero y el triac. El detector de cruce por cero, generalmente un optoacoplador, identifica cuando el voltaje CA cruza 0 V, es decir, cuando cambia de positivo a negativo y viceversa. Los triacs son dispositivos semiconductores que permiten que la corriente alterna pase a través de una señal de activación cada medio ciclo. Los triacs son esenciales en los relés de estado sólido porque pueden activarse rápidamente, permitiendo el paso de parte de la onda de voltaje de AC [23].

Para regular el voltaje de AC, el variador debe coordinar el cruce por cero con el

microcontrolador y decidir cuándo activar el triac. Esto le permite regular qué parte de la onda sinusoidal se activará, controlando así la cantidad de energía entregada. Esta técnica, denominada control de ángulo, es ideal para variar el brillo de las bombillas sin provocar parpadeos. Al programar con Arduino, se requiere el uso de interrupciones y temporizadores externos. Otra técnica de control es la modulación por salto de pulso (PPM) [23].

La conexión del módulo se divide en 2 grupos: alimentación y control. En el aparatado de potencia se debe conectar la tensión de alimentación AC a los terminales "AC-IN" y la carga a los terminales "LOAD". En la parte relacionada con el control, hay 4 pines: "VCC" se conecta a 5V DC, "GND" a 0V (GND), "Z-C" es el pin de cruce por cero, y debe conectarse a una entrada digital del Arduino que sea compatible con las interrupciones externas. (pin 2 o pin 3 en Arduino Uno), y "PWM" es el pin de control del disparador triac, conectado a una de las salidas digitales del Arduino [23].

Características:

- Tensión de control: 3,3 a 5V CC.
- Tensión de carga: 110 a 220 V AC (máx.)
- Frecuencia AC: 50 a 60 Hz
- Corriente de carga nominal: 2A
- Corriente de carga máxima: 5A
- Potencia de carga: 440W máximo.
- Triac: BTA16 – 600B
- Aislamiento óptico con: MOC3021 y 4N25
- Dimensiones: 63x30x32 mm

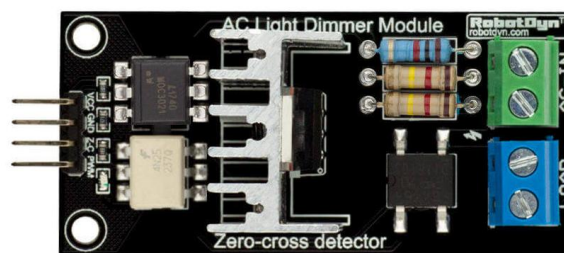


Figura 25. Módulo Dimmer [23].

#### 4.3.4. Transmisor de temperatura PT100 Tipo a 4-20mA

El transmisor de temperatura entrada de RTD-PT100 y salida de 4 – 20mA es un dispositivo que se utiliza para convertir la señal de resistencia de un sensor PT100 en una señal de corriente estándar de 4 – 20mA, que puede ser interpretada fácilmente por los sistemas de control y

monitoreo [24].



Figura 26. Transmisor de Temperatura RTD-PT100 [24].

#### 4.3.5. MAX31865 Módulo amplificador del sensor de temperatura

El MAX31865 es un convertidor de termistor a salida digital diseñado para funcionar con detectores de temperatura de resistencia de platino RTD. Su sensibilidad se ajusta mediante una resistencia externa y el  $\Delta - \Sigma ADC$  de alta precisión convierte la resistencia RTD y la resistencia de referencia en una salida digital. Este dispositivo cuenta con protección contra sobretensión de hasta  $\pm 50 V$  y ofrece detección configurable para condiciones de falla como cortocircuitos y cables abiertos [24].

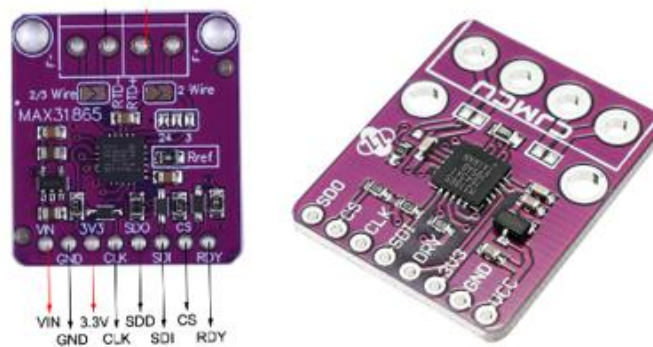


Figura 27. MAX31865 [24].

Especificaciones detalladas:

- **0,5 NC (normalmente cerrado):** Esta especificación puede estar incompleta o fuera de contexto con respecto a MAX31865. Normalmente, "NC" se refiere a un contacto normalmente cerrado en relés e interruptores, pero esto no parece directamente aplicable al MAX31865 sin más contexto [24].

- **50 V (protección contra sobretensiones):** El MAX31865 tiene protección contra sobretensiones de hasta  $\pm 50$  V en sus entradas. Esto significa que las entradas del dispositivo pueden soportar picos de tensión de hasta  $\pm 50$  V sin sufrir daños [24].
- **Entradas  $V_{REF}$  (referencia de voltaje):** Las entradas de referencia de voltaje  $V_{REF}$  son cruciales para la precisión del dispositivo. El MAX31865 utiliza estas entradas para medir la resistencia del RTD y convertirla en una señal digital precisa [24].
- **21 ms (Máximo):** Este es el tiempo de respuesta máximo del dispositivo, es decir, el tiempo necesario para completar una conversión de entrada RTD a salida digital. En este caso, el MAX31865 puede completar la conversión en hasta 21 milisegundos [24].

#### 4.3.6. PT100 con cabezal de aluminio

Industrial PT100 es un sensor de temperatura basado en un detector de temperatura de resistencia de platino (RTD). Este tipo de sensor es muy utilizado en diversas aplicaciones industriales debido a su alta precisión y durabilidad [25].

Principales características

- Composición del sensor: Platino
- Valor de resistencia nominal a  $0^{\circ}\text{C}$ :  $100\ \Omega$
- Rango de medición:  $0^{\circ}\text{C}$  a  $200^{\circ}\text{C}$
- Precisión:  $\pm 0,1^{\circ}\text{C}$
- Elemento sensor: Bombilla o Bulbo
- Rango de resistencia:  $1849K$  a  $39026K$
- Alfa: 0,00385

La PT100 industrial que se observa en la Figura 28 incluye:

- Cabezal de conexión: Fabricado en aluminio.
- Rosca de acoplamiento:  $\frac{1}{2}$  NPT.
- Bombilla o Bulbo: Diámetro  $\frac{1}{4}$  pulgada y longitud 20 cm.

Los sensores industriales PT100-RTD son ideales para una amplia gama de aplicaciones industriales debido a su precisión y robustez.

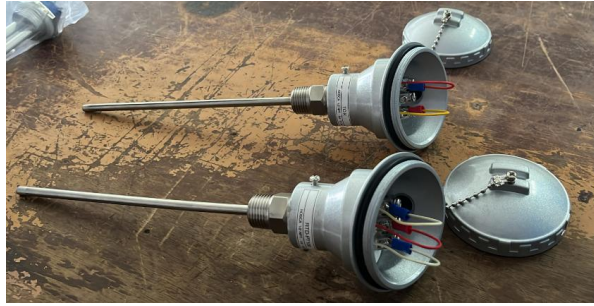


Figura 28. RTD PT-100 y Termocupla tipo “K”

#### 4.3.7. Resistencia tubular

Una Resistencia tubular está diseñada para convertir la energía eléctrica en calor y se utiliza en diversas aplicaciones industriales debido a su durabilidad y eficiencia. Estas resistencias están fabricadas con una aleación de níquel y cromo, lo que les permite soportar altas temperaturas y mantener una buena resistividad. Este material no sólo facilita la generación de calor, sino que también proporciona resistencia a la corrosión y al impacto mecánico [26].

Para este proyecto se necesitó una resistencia tubular con las siguientes especificaciones, además se puede observa en la Figura 29 su estructura:

- Dimensiones: 6 pulgadas
- Potencia: 1000W
- Voltaje: 120V



Figura 29. Resistencia Tubular 1000W-120V

#### 4.3.8. Ventilador Axial

El ventilador axial tipo extractor helicoidal es uno de los más comunes en esta categoría debido a su alta eficiencia. Está diseñado para maximizar el flujo de aire en aplicaciones de extracción, lo que lo hace una opción eficaz para la ventilación en diversas instalaciones [27].

Características:

- Voltaje: 110V
- Corriente: 25 A
- Velocidad: 3.000 rpm
- Flujo de aire: 2,6 a 3 metros cúbicos minuto - 92 a 106 CFM
- Dimensiones: 120x120x38 mm

Este tipo de ventilador es ideal para aplicaciones donde se requiere un alto rendimiento de extracción de aire, proporcionando una solución eficaz para ventilación y refrigeración en entornos industriales y comerciales [27].



Figura 30. Ventilador Axial 110V [27].

#### 4.3.9. Pantalla Nextion Programable

La pantalla Nextion es una pantalla versátil que es fácil de integrar con varias plataformas, incluidas Raspberry Pi A+, B+, Raspberry Pi 2 y Arduino la cual ofrece las siguientes características:

- Resolución: 800 × 480 píxeles
- Colores: 65.000 colores RGB reales
- Tipo de pantalla: TFT con pantalla táctil resistiva de 4 hilos, compatible con Raspberry Pi y Arduino
- Interfaz: Conexión de 4 pines para cualquier host serie TTL, adecuado para Arduino
- Memoria Flash: 16 MB para almacenar datos y código de aplicación del usuario
- Almacenamiento: Tarjeta micro-SD incorporada para actualizar el firmware
- Área de visualización: 108 mm (largo) × 64,8 mm (ancho)
- Brillo ajustable: De 0 a 230 nit, con un rango de ajuste del 1%
- Consumo de energía: 5 V, 410 mA

Esta pantalla Nextion combina una pantalla táctil intuitiva con una interfaz simple para una integración rápida y eficiente en proyectos que requieren una interfaz gráfica avanzada [28].



Figura 31. Pantalla Nextion Programable 5 pulgadas [28].

#### 4.4. DESARROLLO DEL SOFTWARE DE CONTROL

En esta sección se abordará la parte del control del proyecto, el cual está dividido en los siguientes componentes:

- Sistema de regulación para la carga resistiva.
- Control Fuzzy para la obtención de todas las variables de temperatura.
- Configuración del Módulo amplificador del sensor de temperatura MAX31865.
- Configuración del Transmisor de temperatura para RTD-PT100.
- Sistema Nextion que controlará todo el sistema a través de la pantalla programable y su software de configuración.

##### 4.4.1. Sistema de control para la carga mediante módulo Dimmer.

Para el control de la carga resistiva se la realizo mediante la programación del Arduino uno con el módulo Dimmer Robotdyn el cual detecta el ángulo de disparó de la misma resistencia, en los cuales se utilizan funciones de pertenencia difusas para gestionar su salida de manera precisa.

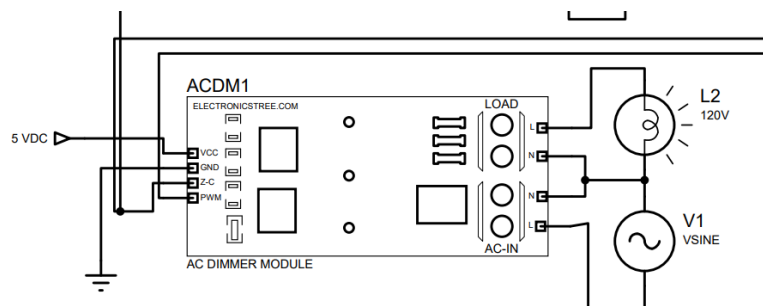


Figura 32. Circuito de control de la carga resistiva.

Este diagrama de conexión que muestra la Figura 32, es el responsable de recibir la señal de la salida del Arduino para así con ello poder controlar la temperatura a la cual estará trabajando la

niquelina al momento que se le dé un set point dentro del software de Nextion el esquema completo se encuentra en el Anexo A y C.

#### 4.4.1.1. Programación del Módulo Dimmer mediante Arduino Uno

Esta sección presenta el diagrama de flujos sobre la programación del módulo Dimmer para controlar la carga o resistencia tubular usando un Arduino Uno, como se aprecia en la Figura 34.

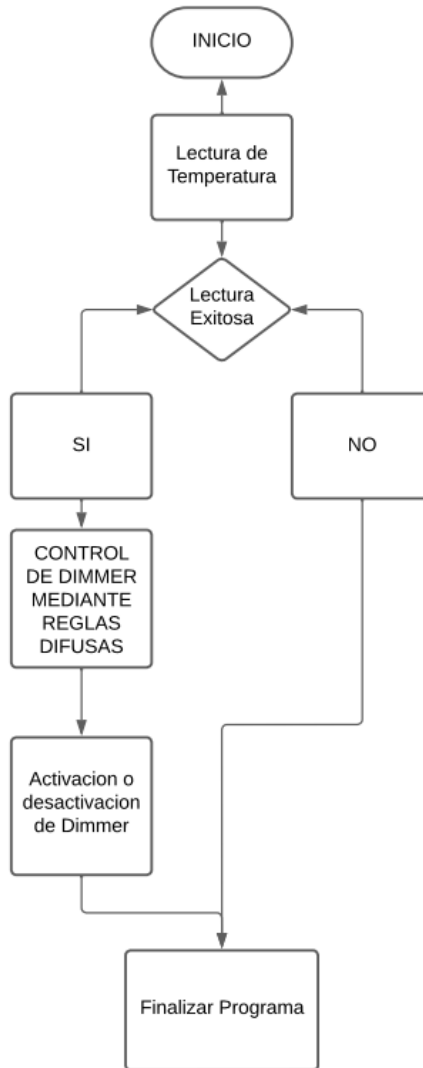


Figura 33. Diagrama de flujos de la programación del módulo Dimmer.

#### 4.4.2. Control Fuzzy para la obtención de todas las variables de temperatura.

Mediante la lógica Fuzzy se pudo obtener las siguientes reglas difusas utilizadas para la obtención de datos y el control de las mismas:

##### 4.4.2.1. Reglas Difusas

Regla 1:

- Condición: Si la temperatura es muy fría y el error es negativo.

- Acción: Entonces, la resistencia se ajusta a alta y el ventilador está apagado.
- Explicación: Cuando la temperatura está muy por debajo del punto de ajuste y el error es negativo (es decir, la temperatura medida es mucho menor que el set point), se necesita calentar rápidamente, por lo que la resistencia se pone alta y el ventilador se apaga para evitar enfriar más el sistema.

Regla 2:

- Condición: Si la temperatura es fría y el error es negativo.
- Acción: Entonces, la resistencia se ajusta a media y el ventilador está apagado.
- Explicación: Cuando la temperatura se encuentra por debajo del punto de ajuste y el error es negativo (aunque menos que en la regla 1), se requiere un calentamiento moderado. La resistencia se ajusta a media y el ventilador sigue apagado para evitar enfriar.

Regla 3:

- Condición: Si la temperatura es tibia y el error es central.
- Acción: Entonces, la resistencia se ajusta a baja y el ventilador está lento.
- Explicación: Cuando la temperatura está cerca del punto de ajuste y el error es central (la temperatura medida es aproximadamente igual al set point), se necesita un pequeño ajuste. La resistencia se ajusta a baja y el ventilador se pone lento para mantener la temperatura.

Regla 4:

- Condición: Si la temperatura es caliente y el error es central.
- Acción: Entonces, la resistencia está apagada y el ventilador está medio.
- Explicación: Cuando la temperatura está un poco por encima del punto de ajuste y el error es central (la temperatura medida es aproximadamente igual al set point), no se necesita más calentamiento. La resistencia se apaga y el ventilador se pone en una velocidad media para enfriar ligeramente.

Regla 5:

- Condición: Si la temperatura es muy caliente y el error es cero.
- Acción: Entonces, la resistencia está apagada y el ventilador está rápido.
- Explicación: Cuando la temperatura está mucho por encima del punto de ajuste y el error es cero (lo que indica que la temperatura medida es igual o muy cerca al set point),

se necesita enfriar rápidamente. La resistencia se apaga y el ventilador se pone rápido para enfriar el sistema.

#### 4.4.2.2. Diagramas de Funciones de Pertenencia

Las funciones de pertenencia trapezoidales para las entradas (temperatura y error) y salidas (resistencia y ventilador) se pueden visualizar de la siguiente manera:

- **Temperatura (entrada):**

La Figura 34 muestra cinco conjuntos difusos, cada uno de los cuales representa un rango de temperatura con diferentes grados de membresía. En la Tabla 4 se detalla cada una:

Tabla 4. Conjuntos de membresía para la temperatura

<b>CONJUNTOS DIFUSOS DE TEMPERATURA</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Rango [°C]</b>	<b>Forma</b>	<b>Detalle</b>
<b>Muy Frio</b>	0-30	Trapezoidal	La adherencia es como máximo (1) entre 5 y 10 grados. La adherencia disminuye linealmente desde 0 grados (con 0 adherencia) a 5 grados, y de 10 grados a 30 grados, donde vuelve a 0.
<b>Frio</b>	15-40	Triangular	La adherencia aumenta linealmente de 0 en 15 grados a 1 en 20 grados, luego disminuye linealmente de 1 en 20 grados a 0 en 40 grados.
<b>Tibio</b>	30-70	Triangular	La adherencia aumenta linealmente de 0 en 30 grados a 1 en 45 grados, luego disminuye linealmente de 1 en 45 grados a 0 en 70 grados.
<b>Caliente</b>	55-100	Triangular	La adherencia aumenta linealmente de 0 en 55 grados a 1 en 60 grados, luego disminuye linealmente de 1 en 60 grados a 0 en 100 grados.
<b>Muy Caliente</b>	90-120	Trapezoidal	La adherencia es máxima (1) entre 110 y 120 grados. La adherencia aumenta linealmente de 0 en 90 grados a 1 en 110 grados.

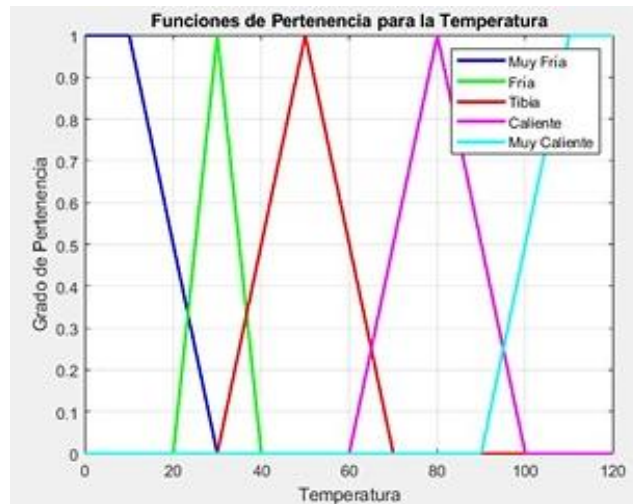


Figura 34. Función de membresía para la temperatura

- **Error (entrada):**

La Figura 35 muestra tres conjuntos difusos, cada uno de los cuales representa un rango de errores con diferentes grados de pertenencia. En la Tabla 5 se detalla cada una:

Tabla 5. Conjuntos de membresía para el error.

<b>CONJUNTOS DIFUSOS DEL ERROR</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Rango [°C]</b>	<b>Forma</b>	<b>Detalle</b>
<b>Error negativo</b>	-80 a 0	Triangular	La membresía es máxima (1) en -30 y disminuye linealmente hacia 0 en los extremos -80 y 0, donde la membresía es 0. Esto significa que los errores negativos grandes (cerca de -80) y los errores cercanos a 0 tienen una baja adherencia, mientras que los errores alrededor de -30 tienen una alta adherencia.
<b>Centro de errores</b>	-20 a 20	Triangular	La membresía es máxima (1) en 0 y disminuye linealmente hacia 0 en los extremos -20 y 20. Esto indica que los errores cercanos a cero tienen una membresía alta, mientras que los errores alejados de cero hacia -20 o 20 tienen una adherencia baja.

**Cero errores**

0 a 80

Triangular

La membresía es máxima (1) en 30 y disminuye linealmente hacia 0 en los extremos 0 y 80. Esto significa que los errores más cercanos a 30 tienen una membresía alta, mientras que los errores más cercanos a 0 u 80 tienen una membresía baja.

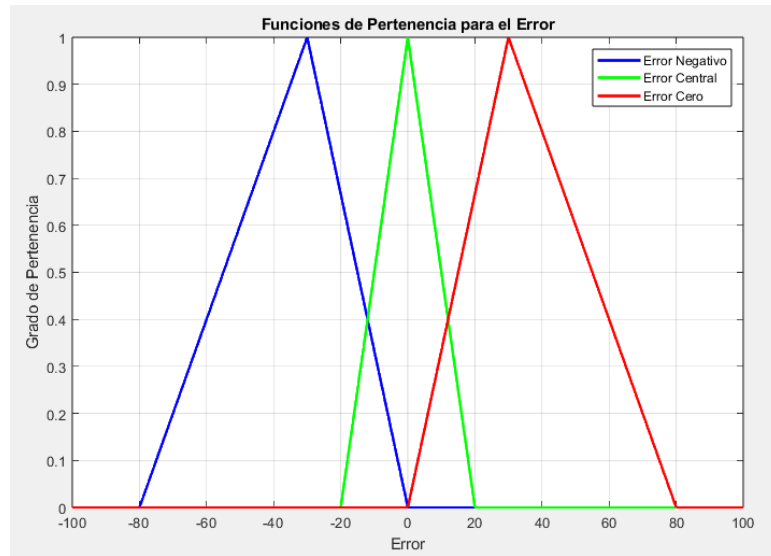


Figura 35. Función de pertenencia para el error.

- **Resistencia (salida):**

La Figura 36 muestra cuatro conjuntos difusos, cada uno de los cuales representa un rango de resistencia con diferentes grados de membresía. En la Tabla 6 se detalla cada una:

Tabla 6. Conjuntos de membresía para la Resistencia.

<b>CONJUNTOS DIFUSOS DE RESISTENCIA</b>			
Tipo	Rango [°C]	Forma	Detalle
<b>Resistencia apagada</b>	0-10	Triangular	La adherencia es máxima (1) en 5 y disminuye linealmente hacia 0 en los extremos 0 y 10. Esto significa que los valores de resistencia cercanos a 5 tienen una alta adherencia, mientras que los valores cercanos a 0 o 10 tienen una baja adherencia.

<b>Baja resistencia</b>	0-40	Triangular	La adherencia es máxima (1) en 10 y disminuye linealmente hacia 0 en los extremos 0 y 40. Esto indica que los valores de resistencia cercanos a 10 tienen una alta adherencia, mientras que los valores cercanos a 0 o 40 tienen una baja adherencia.
<b>Media resistencia</b>	20-80	Triangular	La adherencia es máxima (1) en 35 y disminuye linealmente hacia 0 en los extremos 20 y 80. Esto significa que los valores de resistencia cercanos a 35 tienen una alta adherencia, mientras que los valores cercanos a 20 u 80 tienen una baja adherencia.
<b>Alta resistencia</b>	50-100	trapezoidal	La adherencia es máxima (1) entre 75 y 85. La adherencia aumenta linealmente de 0 en 50 a 1 en 75, y disminuye linealmente de 1 en 85 a 0 en 100. Esto indica que los valores de resistencia cercanos a 75 y 85 tienen alta adherencia, mientras que valores cercanos a 50 o 100 tienen baja adherencia.

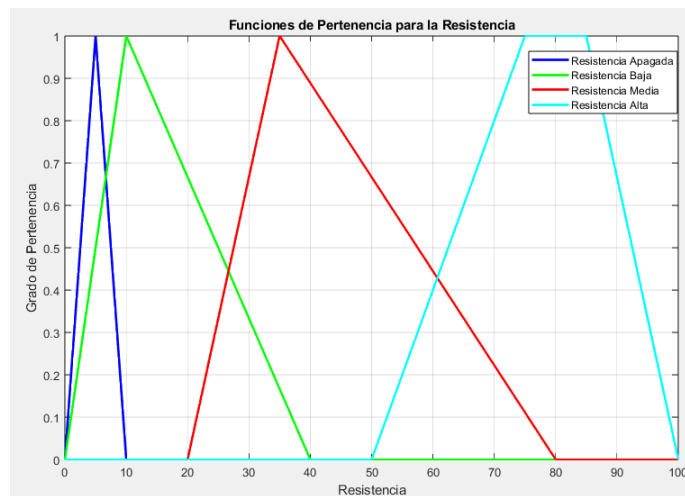


Figura 36. Función de membresía para la resistencia

- **Ventilador (salida):**

La Figura 37 muestra cada una de las diferentes velocidades, representando un rango de velocidad con diferentes niveles de velocidad. En la Tabla 7 se detalla cada una:

Tabla 7. Conjuntos de membresía para el ventilador axial.

<b>CONJUNTOS DIFUSOS DEL VENTILADOR AXIAL</b>			
<b>Tipo</b>	<b>Rango [°C]</b>	<b>Forma</b>	<b>Detalle</b>
<b>Ventilador Apagado</b>	0	Triangular	La pérdida es constante y máxima (1) a 0. Esto significa que cuando el ventilador está apagado, la pérdida siempre es 1.
<b>Ventilador Lento</b>	0-30	Triangular	La pérdida es máxima (1) en 10 y disminuye linealmente desde 0 hasta los extremos 0 y 30. Esto indica que las velocidades del ventilador alrededor de 10 tienen una pérdida alta, pero las velocidades de 0 a 30 tienen una pérdida baja.
<b>Ventilador Medio</b>	30-60	Triangular	La pérdida es máxima (1) en 40 y disminuye linealmente entre 0 y los extremos 30 y 60. Esto significa que las velocidades del ventilador en 40 tienen una pérdida alta, pero las velocidades en 30 o 60 tienen una pérdida baja.
<b>Ventilador rápido</b>	40-100	trapezoidal	La pérdida es máxima (1) entre 60 y 80. La pérdida aumenta linealmente de 0 en 40 a 1 en 60, y disminuye linealmente de 1 en 80 a 0 en 100. Esto indica que las velocidades del ventilador están en 60 y 80 siendo 80 una velocidad alta, pero las velocidades de 40 o 100 mantienen la velocidad baja.

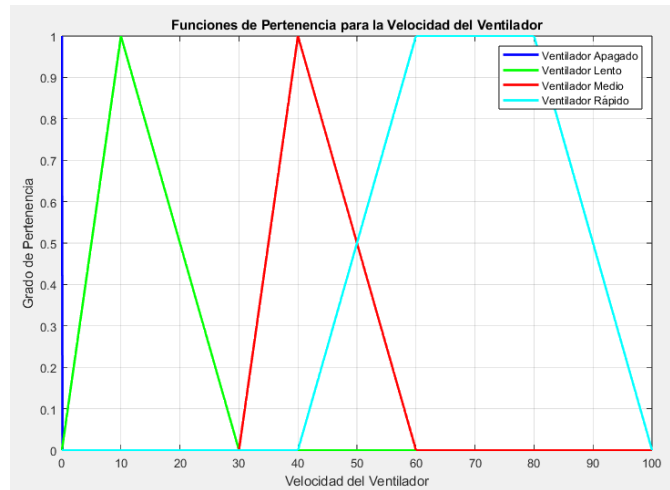


Figura 37. Función de membresía para la velocidad del ventilador

#### 4.4.2.3. Lógica de Programación Arduino

Todas estas funciones de membresía se encuentran en el programa Fuzzy simulado en la placa de Arduino Uno se observa en la Figura 38 la lógica de programación basada en un flujograma su funcionamiento es comparar la temperatura medida mediante el sensor de temperatura con la del Setpoint y mediante esto el programa toma una serie de decisiones ya sea incrementar el porcentaje de la niquelina o apagar el ventilador mediante la toma de decisiones que se le haya dado en las funciones de pertenencia establecidas dentro de la programación.

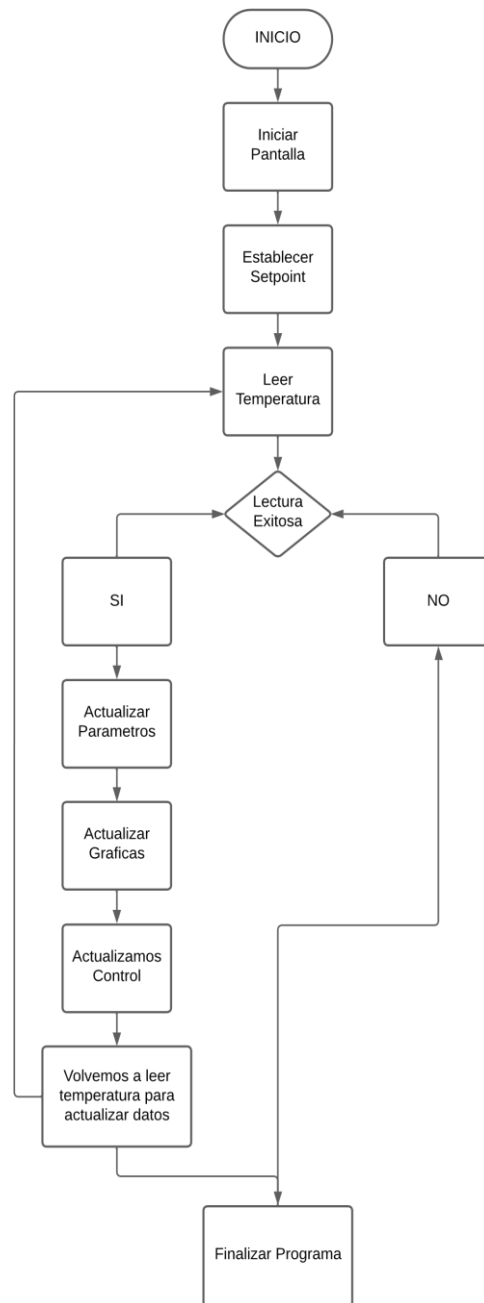


Figura 38. Flujograma de la lógica de programación.

#### 4.4.3. Configuración del Módulo amplificador del sensor de temperatura MAX31865

El código permite leer la temperatura de un sensor PT100-RTD usando el módulo MAX31865 y mostrar el valor de temperatura en el puerto serie. Esto permite monitorear la temperatura en tiempo real mediante los siguientes parámetros:

##### Configuración del sensor:

- Configurar el módulo MAX31865 para que funcione con un sensor PT100-RTD.

##### Lectura de temperatura:

- Leer la temperatura del sensor PT100-RTD.

**Pantalla:**

- Envía el valor de temperatura leído al puerto serie para su visualización en un monitor serie.
- Configura la comunicación serie y el módulo MAX31865.
- En bucle infinito, lee la temperatura cada segundo y la muestra en el monitor serie.

**4.4.4. Configuración del Transmisor de temperatura para RTD-PT100**

El diagrama que se observa en la Figura 39 muestra un sistema de adquisición de datos que utiliza un sensor RTD-PT100 para medir la temperatura. La RTD-PT100 es un sensor de resistencia cuya resistencia varía con la temperatura, desde 100 ohmios a 0°C.

En el sistema, el sensor está conectado a un transmisor de corriente que convierte la señal de resistencia en una señal de corriente estándar de 4 a 20 mA, proporcional a la medición de temperatura, esta señal de corriente es alimentada por una fuente de 24 V, que proporciona la energía necesaria para operar el transmisor luego, la señal de corriente se convierte en una señal de voltaje (0 – 5 VDC) mediante un convertidor de corriente a voltaje, la señal de voltaje resultante se envía a la interfaz de adquisición de datos, donde es digitalizada y procesada para obtener la temperatura correspondiente con el **Anexo C** terminado.

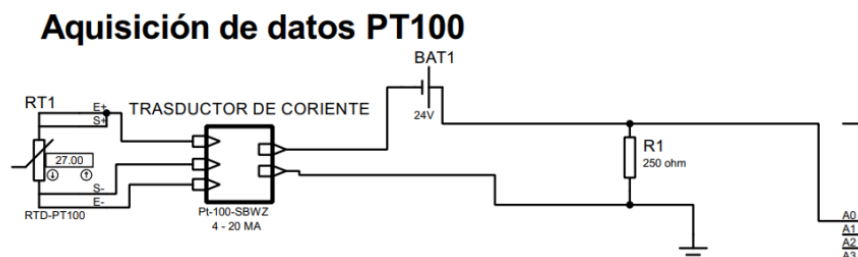


Figura 39. Conexión de Transmisor de temperatura

**4.4.5. Sistema Nextion**

Mediante la conexión serial del Arduino mega y la pantalla Nextion se pudo realizar la programación el Arduino Mega, la cual tiene incluida la librería de conexión de Nextion.

**Características principales del Código****Inicialización:**

- Configura la comunicación serial.
- Inicializa la comunicación con la pantalla Nextion.

**Lectura de Datos Seriales:**

- Lee una cadena de datos del puerto.

- Utiliza la función `D.separa`` para separar los datos en diferentes variables.

#### **Conversión de Datos:**

- Convierte las cadenas de texto leídas a valores flotantes: Temperatura, resistencia y ventilador.

#### **Actualización de la Pantalla Nextion**

- Muestra los valores de Temperatura, resistencia y ventilador en la pantalla Nextion utilizando los objetos *nexTemp*, *nexres* y *nexvel*.
- Añade los valores a los gráficos de la pantalla Nextion.

#### **Lectura y Envío del SetPoint:**

- Obtiene el valor del setPoint desde la pantalla Nextion y lo guarda en la variable setPoint.
- Envía el valor del setPoint al puerto Serial1 y lo imprime en Serial.

#### **Retardo:**

- Espera 1 segundo antes de repetir el bucle.

#### **4.4.5.1. Configuración del Software Nextion**

Mediante el Software de Nextion se pudo realizar el diseño de la pantalla programable con los parámetros tomados directamente desde la programación de Arduino Mega el cual convierte los datos del MAX31865 de forma serial y los transforma en valores flotantes los cuales estarán variando de manera que se le aplique un SetPoint a la pantalla y el proceso de la planta busque igualar dicho valor.

En las cuales se ha diseñado 3 páginas para la simulación que se dividen de la siguiente manera:

- **Página 1**

En esta página lo que se observa es la interfaz de inicio con el logo de la Universidad Técnica de Cotopaxi como se observa en la Figura 40 que al cabo de 2 segundos esta cambiara para comenzar con la Página 2.



Figura 40. Interfaz de Inicio en software Nextion.

- **Página 2**

En esta página están configurados los parámetros a mostrar en la pantalla programable Nextion como se observa en la Figura 41.



Figura 41. Datos obtenidos de Programación y conexión Nextion.

Los cuales están distribuidos de la siguiente manera:

- **SetPoint:** Temperatura a la que debe alcanzar el Horno.
- **Temp:** Temperatura que está alcanzando la medición del sensor con respecto a la resistencia que se está calentando.
- **%P Re:** Porcentaje de Potencia que está entregando la niquelina.
- **Velc:** Velocidad a la que el ventilador axial está trabajando.
- **Siguiente:** Boton configurado para pasar a la Página 3 del proyecto

Estos parámetros dentro de la Pagina dos son obtenidos mediante la programación del Arduino uno y el MAX31865 los cuales están conectados de manera serial con el Arduino Mega para poder tomar estos datos los mismos que son colocados dentro de la configuración de la pantalla Nextion y ejecutados hacían la pantalla física.

- **Página 3**

Como se observa en la Figura 42, esta página muestra la respuesta a través del tiempo de los parámetros de Temperatura, porcentaje al cual está trabajando la niquelina y la velocidad del ventilador axial al cual se le añadió un botón el cual permite regresar a la pantalla anterior para observar los datos de manera numérica.

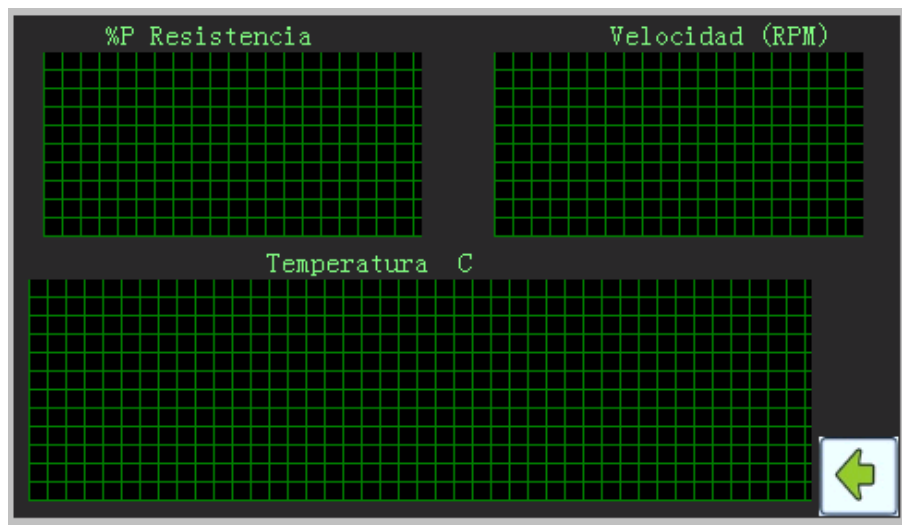


Figura 42. Respuestas gráficas a través del tiempo.

## 5. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En este capítulo se detalla el análisis y resultados obtenidos al realizar las pruebas de funcionamiento del sistema Fuzzy con la integración de la pantalla Nextion, los mismos que nos permiten controlar las variables de entradas y poder analizar los datos recolectados y así poder verificar el correcto funcionamiento del módulo controlador de temperatura diseñado para los hornos.

### 5.1. MÓDULO DE HORNOS DE TEMPERATURA

Tal como se mencionó en el apartado anterior, se consiguió construir los hornos de temperatura y diseñar su sistema fuzzy para llevar a cabo pruebas con el propósito de verificar su funcionamiento, en el **ANEXO A** y **B**, se puede visualizar los esquemas de conexión que se

debe realizar en cada horno con el módulo de control y poder controlar las variables de temperatura mediante un setpoint.

## 5.2. PRUEBA DEL CONTROL FUZZY DE TEMPERATURA Y SUS VARIANTES CON SISTEMA MAX31865.

La programación del fuzzy para determinar las constantes del control, se emplearon los métodos de sintonización detallados en los capítulos anteriores, y de manera más detallada en la fundamentación teórica. En el caso del horno, se utilizó un setpoint de  $40^{\circ}\text{C}$ , medido por la Termocupla tipo “K”, obteniendo los resultados y recopilando la información en tiempo real, la cual se muestra en la Figura 43 donde se visualiza el valor asignado en el sistema fuzzy, además podemos observar el Set Point planteado, la medición del sensor de temperatura, la potencia del ventilador axial y a qué porcentaje está trabajando nuestra resistencia o níquelina.

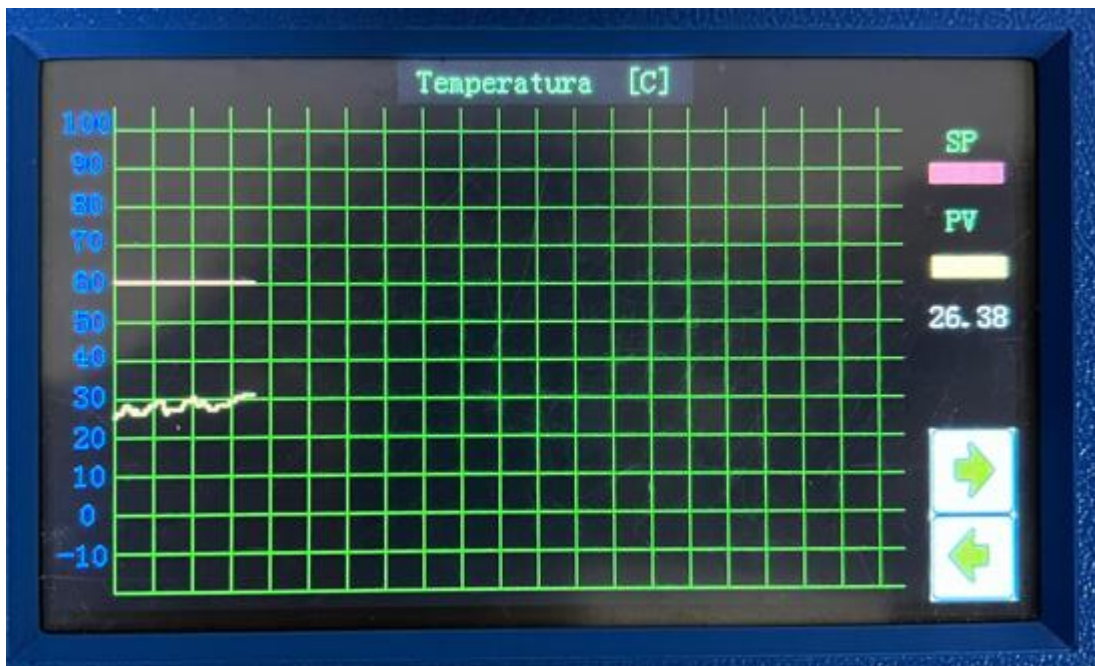


Figura 43. Panel frontal sistema Nextion.

En la Figura 44 se muestra el comportamiento del control fuzzy con un setpoint de  $40^{\circ}\text{C}$  y de igual manera, se puede apreciar cómo se generan las curvas con los valores de tendencia de las variables de temperatura en tiempo real.

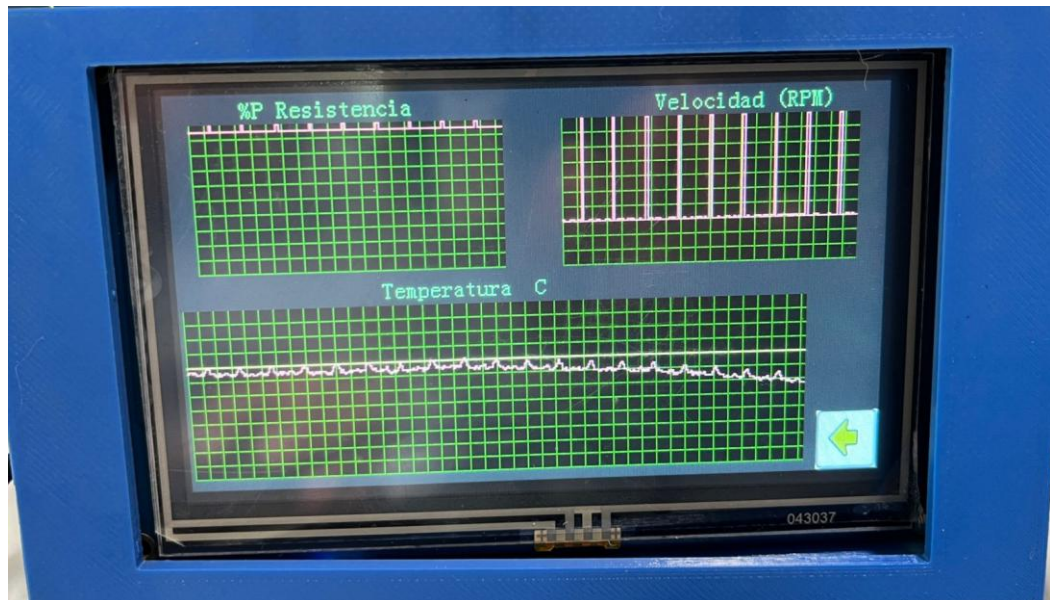


Figura 44. Comportamiento de las Variables con un Setpoint de 40°C.

Mediante ello se puede observar en la Tabla 8 el reporte de las variables de entrada y salida hasta que esta misma logre alcanzar al setpoint establecido y siguiendo las reglas difusas que se les ha establecido.

Mediante la obtención de datos dados en la Tabla 8, se puede apreciar que el sistema está cumpliendo con las reglas de lógica difusa dadas ya que esta al momento de que nuestra resistencia no este alcanzando el Setpoint establecido nuestro sistema mantiene la niquelina encendida y el ventilador en un estado donde si velocidad es casi nula, pero al este alcanzar una temperatura mayor a la del setpoint el sistema buscara establecer esta temperatura a una menos o igual a la del setpoint dado cumpliendo otras de las reglas difusas que se ha establecido, dando mayor porcentaje de velocidad al ventilador y siendo nuestra niquelina automáticamente apagada cuando este detecte una temperatura mayor a la deseada.

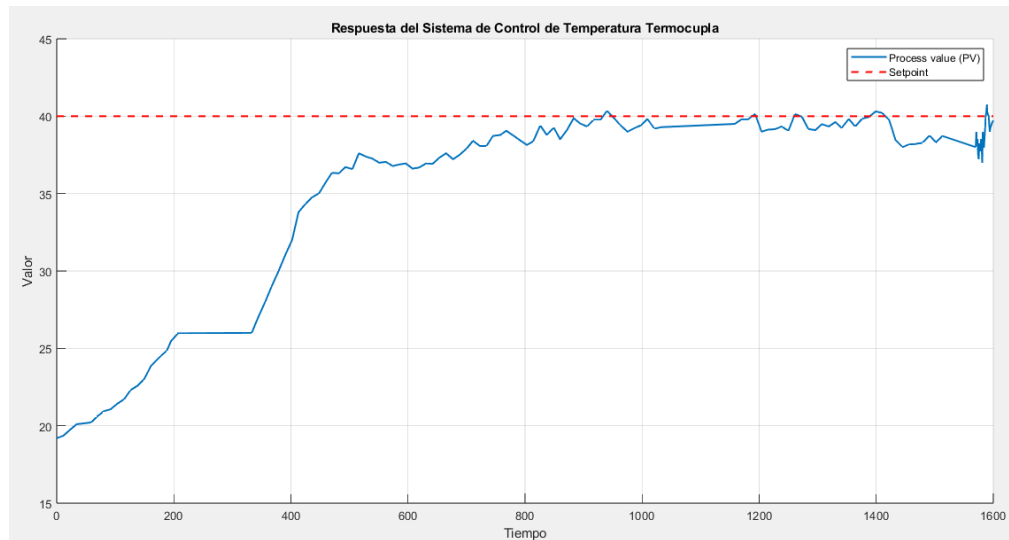


Figura 45. Respuesta del sistema de control con un setpoint 40°C

La Figura 45 muestra el incremento de la temperatura medida en relación con el setpoint de 40°C a lo largo del tiempo, la línea azul representa el setpoint, que se mantiene constante en 40°C durante todo el período de medición en cambio la línea naranja muestra la temperatura medida, que inicialmente comienza muy por debajo del setpoint y luego se incrementa progresivamente hasta estabilizarse cerca del objetivo de 40°C.

Al inicio, a los 321[s], la temperatura medida está alrededor de los 26°C, significativamente por debajo del setpoint. Este gran error negativo implica que el sistema debe aplicar una alta potencia de calentamiento para acercarse rápidamente a la temperatura al setpoint.

Esto es coherente con la Regla 1 de las reglas difusas la cual establece que cuando la temperatura es muy fría y el error es negativo, la resistencia debe ajustarse a alta potencia y el ventilador debe estar apagado para evitar enfriar más el sistema.

Entre los 321[s], y los 550 [s], se observa un rápido aumento en la temperatura medida, que sube de 26°C a cerca de 32°C. Este comportamiento indica que la resistencia está trabajando a alta potencia, conforme a las reglas difusas que dictan un calentamiento intensivo en presencia de grandes errores negativos.

A partir de los 641[s], la temperatura medida se aproxima a los 37 – 38°C y comienza a mostrar un ritmo de aumento más lento. Durante este período, se pueden observar oscilaciones menores alrededor del setpoint. La temperatura fluctúa en un rango estrecho, lo que sugiere que el sistema está ajustando la potencia de la resistencia y la velocidad del ventilador para mantener la temperatura cerca del objetivo.

Esta fase corresponde a una combinación de las reglas 2 y 3 de las reglas difusas las cuales indican que a medida que el error negativo disminuye, la resistencia se ajusta a una potencia

media o baja, y el ventilador se mantiene apagado o en baja velocidad para prevenir el enfriamiento excesivo.

En momentos específicos, como alrededor de las 734 [s], la temperatura medida alcanza e incluso supera ligeramente los 40°C. En estos puntos, el error se vuelve positivo, aunque sea mínimamente, lo que activa la Regla 4 de las reglas difusas: la resistencia se apaga y el ventilador puede aumentar su velocidad para enfriar el sistema y volver a estabilizar la temperatura medida cerca del setpoint.

### 5.3. PRUEBA DEL CONTROL FUZZY DE TEMPERATURA TRASMISOR RTD-PT100.

La programación del fuzzy se utilizó para determinar las constantes del control mediante métodos de sintonización descritos en los apartados anteriores. En este caso, para el horno, se aplicó los setpoint de 40°C censado por la PT100.

Mediante la obtención de datos dados en la Tabla 9, se puede apreciar que el sistema está cumpliendo con las reglas de lógica difusa dadas ya que esta al momento de que nuestra resistencia no este alcanzando el Setpoint establecido nuestro sistema mantiene la niquelina encendida y el ventilador en un estado donde si velocidad es casi nula, pero al este alcanzar una temperatura mayor a la del setpoint el sistema buscara establecer esta temperatura a una menos o igual a la del setpoint dado cumpliendo otras de las reglas difusas que se ha establecido, dando mayor velocidad al ventilador y siendo nuestra niquelina automáticamente apagada cuando este detecte una temperatura mayor a la deseada.

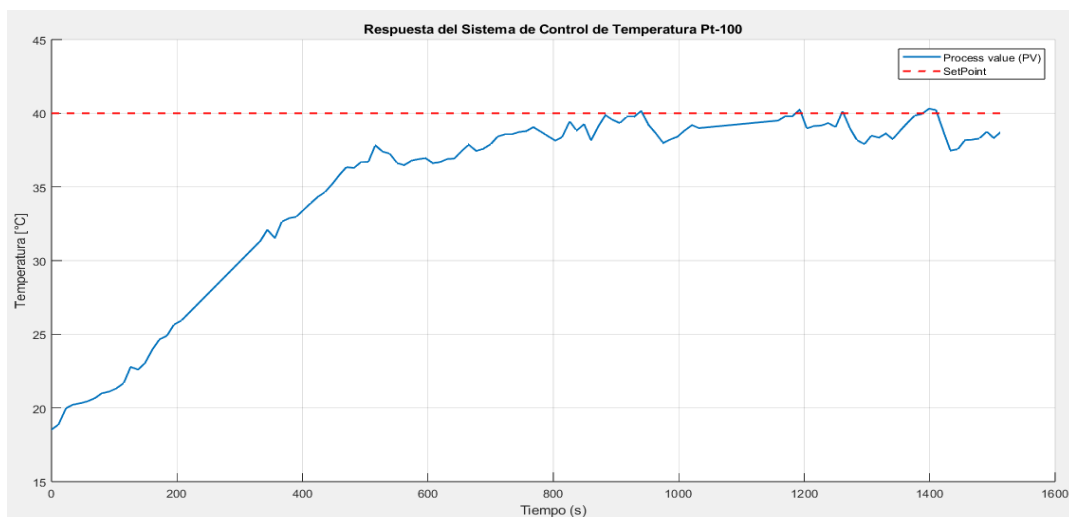


Figura 46. Comportamiento de la variable temperatura para un setpoint 40°C

Como se observa en la Figura 46 el análisis de los datos de temperatura en relación con el

SetPoint de 40°C revela el comportamiento del sistema de control difuso a lo largo del tiempo, que sigue una serie de reglas para ajustar la potencia de la resistencia y la operación del ventilador. Al inicio del proceso, a las 390[s], la temperatura medida está alrededor de los 26°C, lo que está significativamente por debajo del SetPoint de 40°C. Este gran error negativo sugiere que el sistema aplica una alta potencia de calentamiento para elevar rápidamente la temperatura hacia el objetivo, lo cual es coherente con la Regla 1 de las reglas difusas. Esta regla indica que, cuando la temperatura es muy fría y el error es negativo, la resistencia debe operar a alta potencia mientras que el ventilador permanece apagado para evitar enfriar más el sistema.

Entre los 390[s], y 436[s], la temperatura medida aumenta rápidamente desde los 26°C hasta aproximadamente 32°C. Este comportamiento es indicativo de un calentamiento intensivo, conforme a las reglas difusas que establecen que, en presencia de grandes errores negativos, la resistencia debe trabajar a máxima potencia. A partir de los 488[s], la temperatura medida se aproxima a los 37-38°C y muestra un ritmo de aumento más lento. En esta fase, las oscilaciones menores alrededor del SetPoint sugieren que el sistema está ajustando la potencia de la resistencia y la velocidad del ventilador para mantener la temperatura cerca del objetivo. Esta fase corresponde a una combinación de las Reglas 2 y 3 de las reglas difusas, que indican que a medida que el error negativo disminuye, la resistencia se ajusta a una potencia media o baja, y el ventilador se mantiene apagado o en baja velocidad para prevenir un enfriamiento excesivo.

#### **5.4.COMPARACIÓN DEL CONTROL FUZZY DE TEMPERATURA CON TRASMISOR SITRANS Y SENSOR MAX31865**

Para representar esta comparación se procedió a establecer un setpoint de 40 grados Celsius en los dos hornos tanto en el que trabaja con la termocupla tipo “K” como el que funciona con la RTD-PT100 y se estableció que inicie en una temperatura que este alrededor de los 19 grados Celsius y así poder evaluar el comportamiento de los sensores y el tiempo de respuesta tomando en cuenta las variables a analizar.

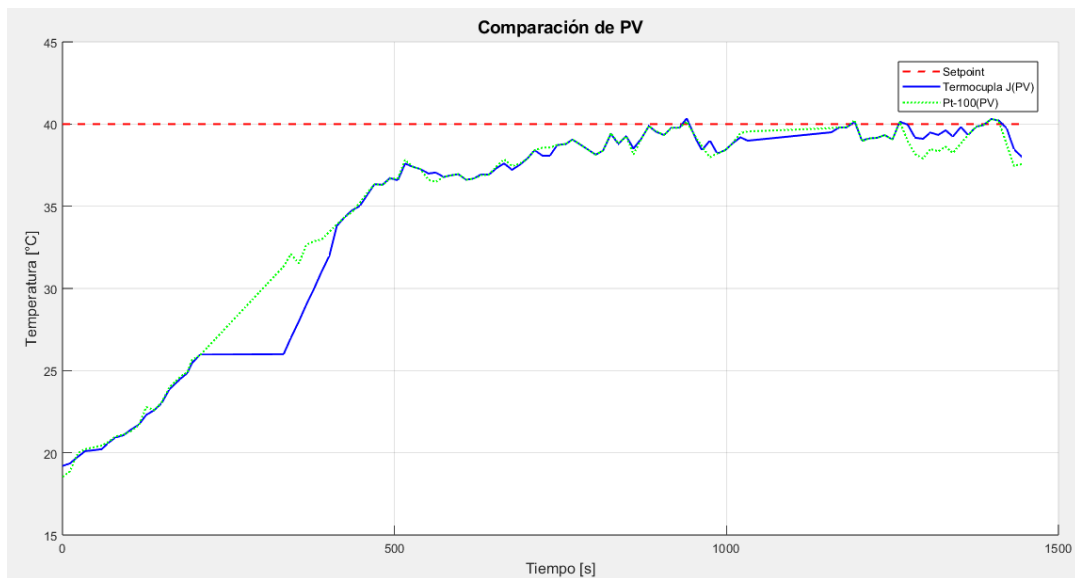


Figura 47. Comparación de PV Termocupla-PT100

Como se puede apreciar en la Figura 47, el sistema tiene como objetivo alcanzar y mantener una temperatura constante de 40 °C (setpoint), para lo cual se analizaron dos mediciones de temperatura registradas a lo largo del tiempo ambas mediciones reflejan un comportamiento similar, comenzando con temperaturas iniciales alrededor de 19 °C y aumentando gradualmente hacia el setpoint, se observan diferencias significativas en la respuesta de cada medición el PV de la Termocupla muestra una respuesta más rápida y estable en comparación con el PV de la Pt-100, durante el comienzo, la temperatura de PV de la Termocupla aumenta de manera constante, alcanzando el setpoint alrededor de los 400-500 segundos. Una vez alcanzada la temperatura objetivo, esta medición presenta ligeras oscilaciones en un rango estrecho de  $\pm 1$  °C, lo que indica un buen desempeño del sistema de control y una mayor precisión en el seguimiento del setpoint, en cambio el PV de la PT-100 tiene un inicio ligeramente más lento y una respuesta transitoria con mayores oscilaciones en el camino hacia el setpoint. Aunque finalmente se aproxima al objetivo de 40 °C, las fluctuaciones son más notorias y persisten incluso después de alcanzarlo, el sistema logra cumplir su objetivo de alcanzar y mantener la temperatura de 40 °C, lo que refleja un desempeño adecuado del control de temperatura, sin embargo, las oscilaciones observadas, especialmente en el PV de la PT-100, sugieren que hay margen de mejora en términos de estabilidad.

### 5.5.COMPARACIÓN DEL CONTROL FUZZY Y CONTROL PID

La comparación entre el control difuso (Fuzzy) y el control PID (Proporcional-Integral-Derivativo) es fundamental para entender las fortalezas y limitaciones de cada enfoque en sistemas de control, el control PID es ampliamente utilizado por su simplicidad y efectividad

en procesos lineales y bien definidos, donde los parámetros se ajustan para minimizar errores y estabilizar el sistema en cambio el control fuzzy se basa en lógica difusa y utiliza reglas lingüísticas para manejar incertidumbres y no linealidades, lo que lo hace ideal para sistemas complejos o imprecisos, mediante ello se pudo comparar los distintos procesos como se observa en la Figura 48.

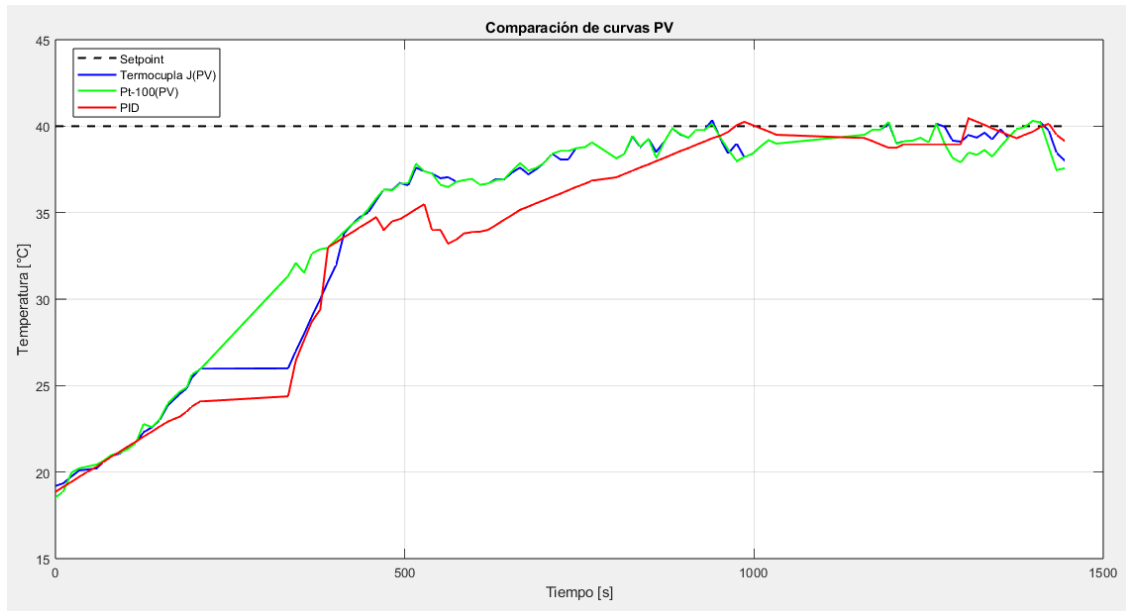


Figura 48. Comparación de PV Fuzzy-PID.

Como se observa en la Figura 48 la representación del Setpoint, PV de la Termocupla, PV de la PT-100 y PV de PID permite evaluar el desempeño del sistema y determinar cuál de ellas es la más adecuada para reflejar la dinámica y el control del proceso de temperatura, mediante la curva Setpoint, constante a 40°C, establece el objetivo del sistema y sirve como referencia para evaluar las otras tres curvas de PV del sistema, mediante la PV de la Termocupla se puede observar un comportamiento más estable que el PV de la PT-100, con un aumento progresivo hacia el setpoint y oscilaciones moderadas, sin embargo, no logra alcanzar el valor deseado con precisión, dejando un error residual en el estado estacionario, en cambio el PV de la Pt-100 muestra un comportamiento moderado con respecto al Setpoint con pequeñas desviaciones esto debido a factores externos siendo esta la mejor opción, la curva PID su respuesta es más rápida al inicio, con una tendencia clara hacia el objetivo y oscilaciones significativamente menores en comparación con el PV de la Termocupla y el PV de la PT-100, al inicio (0-100 segundos), tanto el PV de la Termocupla y el PV de la PT-100 comienzan alrededor de los 19°C, aumentando lentamente y alcanzando solo 21.5°C, mientras que el PID muestra una respuesta más rápida, llegando a 22°C en el mismo intervalo. En el rango de 100 a 300 segundos, el PV de la Termocupla y el PV de la PT-100 siguen incrementando hacia 25°C, pero aún se

mantienen lejos del setpoint de 40°C, mientras que el PID avanza más rápidamente hacia los 33°C. Entre 300 y 600 segundos, el PV de la Termocupla y el PV de la Pt-100 empiezan a estabilizarse cerca de 38°C, aunque con oscilaciones, mientras que el PID se aproxima a 33°C, después de 600 segundos, el PV de la Termocupla y el PV de la PT-100 alcanzan un rango de 39-40°C, todavía con ligeras fluctuaciones, mientras que el PID logra valores cercanos a 39°C con oscilaciones mínimas.

## **6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **6.1. CONCLUSIONES**

- En conclusión, las características no lineales de los procesos térmicos se manejan de manera eficiente mediante el uso de lógica difusa, que permite una adaptación continua a las variaciones del proceso. La funcionalidad de los sistemas difusos, basada en reglas "SI-ENTONCES", proporciona una estructura intuitiva para el diseño de controladores que pueden responder eficazmente a cambios en las condiciones de operación.
- Se han seleccionado sensores de alta precisión como son el sensor MAX31865 y el transmitir RTD-PT100 para medir la temperatura, dispositivos interactivos que detectan y controlan variables reales como las placas Arduino, la mismas que permitieron implementar las reglas difusas y actuadores eficientes mediante lógica de programación para medir la entrada de calor, sin olvidar aquellos elementos que son parte de la estructura como son: estructura del horno, Sondas PT100 y ventiladores.
- El controlador difuso ha mejorado significativamente la estabilidad y precisión del control de temperatura en los hornos. La capacidad del sistema para manejar la incertidumbre y adaptarse a las variaciones del proceso ha resultado en una operación más eficiente y confiable. Además, la facilidad de ajuste y manipulación del módulo fuzzy en conjunto con el horno y los parámetros que este presenta.
- El control PID es altamente eficiente para sistemas lineales o de comportamiento predecible, ofreciendo rapidez y estabilidad en la convergencia hacia el setpoint, pero su desempeño puede degradarse en sistemas con alta incertidumbre o condiciones cambiantes.
- El control Fuzzy, por su parte, es más adecuado para sistemas no lineales, dinámicos o con incertidumbre, gracias a su capacidad para manejar reglas lingüísticas y adaptarse

a entornos complejos. Sin embargo, requiere un diseño más elaborado y conocimiento experto.

- La integración de enfoques híbridos, como el PID-Fuzzy, combina las fortalezas de ambos métodos, permitiendo mayor precisión y adaptabilidad en sistemas donde ni el PID ni el Fuzzy, por separado, son completamente efectivos.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Es necesario controlar las variables de temperatura de ambos hornos, considerando el rango mínimo y máximo de temperatura especificado por las características de los sensores utilizados en la medición. Para ello, se deben calibrar y configurar adecuadamente los sensores de cada horno, garantizando que operen dentro de sus límites especificados para obtener mediciones precisas y confiables.
- Para evitar daños en el módulo, es crucial verificar el diagrama de conexión proporcionado en los anexos. Esto asegurará el correcto funcionamiento de los equipos y componentes utilizados en cada uno de los hornos de temperatura. Siguiendo el diagrama de conexión correctamente, se puede garantizar la integridad del sistema y la operación segura y eficiente de todos los elementos involucrados.
- Se recomienda implementar estrictas medidas de seguridad relacionadas con la manipulación de los hornos, dado que operan a niveles de temperatura que pueden causar lesiones severas. Es fundamental que los operarios utilicen equipos de protección personal adecuados, como guantes térmicos y protección ocular, y que se sigan protocolos de seguridad establecidos para minimizar riesgos.
- Utilizar controladores PID en aplicaciones donde el sistema sea bien definido y las condiciones de operación sean estables, pero apoyarse en herramientas de optimización para ajustar sus parámetros y mejorar el desempeño.
- Implementar controladores Fuzzy en sistemas con alta incertidumbre, no lineales o difíciles de modelar matemáticamente, asegurando un diseño detallado de las reglas que reflejen las condiciones reales del sistema.
- Considerar el uso de controladores híbridos PID-Fuzzy en aplicaciones complejas, donde se necesite tanto la estabilidad y precisión del PID como la flexibilidad y adaptabilidad del Fuzzy, realizando pruebas exhaustivas para validar su rendimiento antes de la implementación final.

**7. BIBLIOGRAFÍA**

- [1] D. S. H. G. y. J. H. G. B. Sergio Andres Castaño Giraldo, «CONTROL Y MONITOREO DE TEMPERATURA PARA UN HORNO DE CURADO DE PRENDAS ÍNDIGO UTILIZANDO LÓGICA DIFUSA Y CONTROLES PI,» Revista Politécnica ISSN 1900-2351, Medellín, 2013.
- [2] D. H. Hidalgo Llumiquinga., 2021. [En línea]. Available: <http://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/20135>. [Último acceso: 08 07 2024].
- [3] R. E. Sailema Medina, 01 2020. [En línea]. Available: [https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/30697/1/Tesis\\_t1664ec.pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/bitstream/123456789/30697/1/Tesis_t1664ec.pdf). [Último acceso: 08 07 2024].
- [4] R. A. AGÁMEZ ROJAS y D. C. ROJAS CASTELLANOS, 2020. [En línea]. Available: <https://repositorio.ecci.edu.co/bitstream/handle/001/1885/Trabajo%20de%20grado.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. [Último acceso: 07 07 2024].
- [5] J. Pampamallco Jara, 2022. [En línea]. Available: [https://cris.utec.edu.pe/ws/portalfiles/portal/21803569/Pampamallco\\_Jara\\_Tesis.pdf](https://cris.utec.edu.pe/ws/portalfiles/portal/21803569/Pampamallco_Jara_Tesis.pdf). [Último acceso: 09 07 2024].
- [6] C. F. Monta Toapanta, 01 2020. [En línea]. Available: [https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/30733/1/Tesis\\_t1685ec.pdf](https://repositorio.uta.edu.ec/jspui/bitstream/123456789/30733/1/Tesis_t1685ec.pdf). [Último acceso: 07 07 2024].
- [7] D. E. ROSALES MANZO, 14 08 2020. [En línea]. Available: <https://rinacional.tecnm.mx/bitstream/TecNM/1489/3/DAVID%20ENRIQUE%20ROSALES%20MANZO%20-%20tesis.pdf>. [Último acceso: 07 08 2024].
- [8] L. J. Salazar Cárdenas, 26 03 2025. [En línea]. Available: <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/9137/1/04%20RED%20219%20TRABAJO%20DE%20GRADO.pdf>. [Último acceso: 07 07 2024].
- [9] C. Palacio Gómez y J. García Sucerquia, 06 12 2010. [En línea]. Available: <https://fisica.udea.edu.co/ojs/ojs/index.php/rcf/article/download/420327/119>. [Último acceso: 07 07 2024].
- [10] G. M. Smith, «DEWESoft,» Blog, 19 Junio 2024. [En línea]. Available: <https://dewesoft.com/es/blog/que-es-un-controlador-pid>. [Último acceso: 21 Enero 2025].

- [11] K. J. Å. y. T. Hägglund, «Automatic Tuning of Simple Regulators,» *IFAC Proceedings Volumes*, vol. II, p. 12, 1984.
- [12] W. I. TOTOY GUILCA y M. D. VÉLEZ RODRÍGUEZ, 2024. [En línea]. Available: <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29084/1/UPS-GT005776.pdf>. [Último acceso: 06 02 2025].
- [13] S. R2M Solution Spain, 21 08 2024. [En línea]. Available: [https://www.r2msolution.es/control-predictivo-basado-en-modelos/?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.r2msolution.es/control-predictivo-basado-en-modelos/?utm_source=chatgpt.com). [Último acceso: 06 02 2025].
- [14] RECHNER. [En línea]. Available: <https://www.rechner-sensors.com/es/documentacion/knowledge/el-sensor-de-temperatura#:~:text=Los%20sensores%20de%20temperatura%20son,el%20cambio%20de%20la%20resistencia..> [Último acceso: 06 02 2025].
- [15] Smith, 21 11 2024. [En línea]. Available: [https://dewesoft.com/es/blog/que-es-acondicionamiento-de-seal?utm\\_source=chatgpt.com](https://dewesoft.com/es/blog/que-es-acondicionamiento-de-seal?utm_source=chatgpt.com). [Último acceso: 06 02 2025].
- [16] I. GmbH, 2025. [En línea]. Available: <https://glossar.item24.com/es/indice-de-glosario/articulo/item//control-de-fase-ingenieria-electrica-1.html>. [Último acceso: 06 02 2025].
- [17] M. O. R. Nave, 2022. [En línea]. Available: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbasees/Electronic/diac.html#:~:text=El%20interruptor%20de%20AC%20triodo,en%20los%20controladores%20de%20iluminaci%C3%B3n..> [Último acceso: 06 02 2025].
- [18] C. C. Lee, «Fuzzy Logic in Control Systems: Fuzzy Logic Controller,» IEEE, 1990, pp. 404-418.
- [19] J.-S. R. Jang, *Neuro-Fuzzy and soft computing*, Prentice-Hall, 1997.
- [20] J. Romero, «GEEKNETIC,» 02 11 2021. [En línea]. Available: GEEKNETIC. [Último acceso: 06 07 2024].
- [21] A. García González, «PANAMAHITEK,» 23 01 2013. [En línea]. Available: García González. [Último acceso: 06 07 2024].
- [22] MASTERPLC.
- [23] NOVATRONIC, [En línea]. Available: <https://novatronicec.com/index.php/product/modulo-dimmer-ac-220v-110v-control-pwm-1-canal-33v-5v/>. [Último acceso: 06 07 2024].
- [24] H. Khan, «DatasheetHub,» 23 06 2023. [En línea]. Available:

- <https://www.datasheethub.com/max31865-pt100-rtd-temperature-sensor-amplifier-module/>. [Último acceso: 06 07 2024].
- [25] TEII.MEX, 14 07 2022. [En línea]. Available: <https://teii.mx/pt100-industrial/#:~:text=El%20Pt100%20con%20cabeza%20marina,seg%C3%BAAn%20l%20requiera%20la%20aplicaci%C3%B3n>. . [Último acceso: 06 07 2024].
- [26] CreadoresWeb.mx, «Polimex,» [En línea]. Available: <https://www.polimex.mx/resistencias-tubulares/#:~:text=Las%20resistencias%20tubulares%20son%20las,en%20metales%20y%20sujetados%20a>. . [Último acceso: 06 07 2024].
- [27] SIBER, «SIBER,» 23 08 2023. [En línea]. Available: <https://www.siberzone.es/blog-sistemas-ventilacion/extractor-helicoidal/#:~:text=Los%20ventiladores%20axiales%20son%20aquellos,direcci%C3%B3n%20en%20que%20lo%20reciben>. . [Último acceso: 06 07 2024].
- [28] Electrostore, 2020. [En línea]. Available: <https://grupoelectrostore.com/shop/displays-y-pantallas/pantalla-nextion-5-nx8048t050-hmi-serial/>. [Último acceso: 06 07 2024].
- [29] D. B. a. J. M. S. Gomariz, Teoría de Control Diseño Electrónico, Barcelona, 1998.
- [30] G. C. y. Y. L. K. H. Ang, «PID Control System Analysis, Design, and Technology,» *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol. Volumen 13, nº 4, p. 559, 2005.
- [31] S. K. y. R. Musalem, «Control Mediante Lógica Difusa,» Editorial Universitario, Valparaíso, 2002.
- [32] SLICETEX, «SLICETEX\_SOPORTE\_TECNICO,» Google, 07 Mayo 2021. [En línea]. Available: <https://foro.slicetex.com/index.php?topic=403.0>. [Último acceso: 22 Enero 2025].
- [33] A. Diaz, «Prezi,» GOOGLE, 31 Julio 2021. [En línea]. Available: <https://prezi.com/aazfvwd5pqyo/modos-de-control-on-off/>. [Último acceso: 10 Febrero 2025].
- [34] Lab-Volt (Quebec) Ltd, Control de proceso de temperatura, Lab-Volt, Ed., Lab-Volt, 2020.
- [35] J. Acedo Sanchez, Diaz de Santos, 05 2023. [En línea]. Available: [https://www.academia.edu/11306803/Control\\_Avanzado\\_de\\_Procesos\\_J\\_Acedo\\_Sanchez](https://www.academia.edu/11306803/Control_Avanzado_de_Procesos_J_Acedo_Sanchez). [Último acceso: 08 07 2024].