



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA

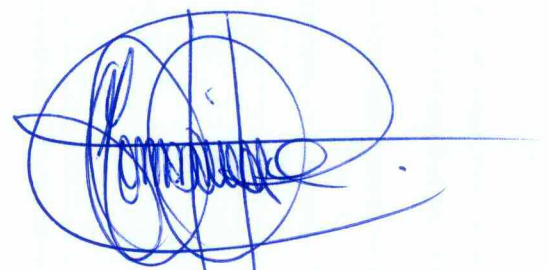
**DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE HORNO INDUSTRIAL CON
UN CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA DE TEMPERATURA
PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del
Título de Ingeniero en Mecatrónica

AUTORES: Kevin Andres Mesias Velasco
Francisco Javier Coello Jara
TUTOR: Franklin Illich Kuonquí Gaínza

Guayaquil - Ecuador
2026

Franklin Illich Kuonquí Gaínza



23/02/26

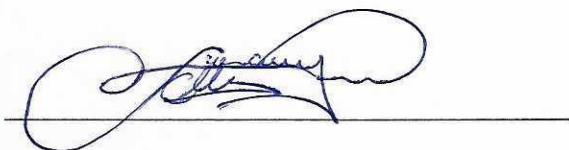
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Francisco Javier Coello Jara** con documento de identificación N° **0950494070** y **Kevin Andres Mesias Velasco** con documento de identificación N° **0952562809**; manifestamos que:

Somos los autores y responsables del presente trabajo; y, autorizamos a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo.

Guayaquil, 20 de Febrero del año 2026

Atentamente,



Francisco Javier Coello Jara
0950494070



Kevin Andres Mesias Velasco
0952562809


**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Francisco Javier Coello Jara** con documento de identificación N° **0950494070** y **Kevin Andres Mesias Velasco** con documento de identificación N° **0952562809**, expresamos nuestra voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que somos autores del **Dispositivo Tecnológico: DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE HORNO INDUSTRIAL CON UN CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA DE TEMPERATURA PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO**, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribimos este documento en el momento que hacemos la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 20 de Febrero del año 2026

Atentamente,



Francisco Javier Coello Jara
0950494070



Kevin Andres Mesias Velasco
0952562809

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Franklin Illich Kuonquí Gaínza**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UN PROTOTIPO DE HORNO INDUSTRIAL CON UN CONTROLADOR DE LÓGICA DIFUSA DE TEMPERATURA PARA PRÁCTICAS DE LABORATORIO**, realizado por **Kevin Andres Mesias Velasco** con documento de identificación N° **0952562809** y por **Francisco Javier Coello Jara** con documento de identificación N° **0950494070**, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción **Dispositivo Tecnológico** que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Guayaquil, 20 de febrero del año 2026

Atentamente,



Ing. Franklin Illich Kuonquí Gaínza, Mg.
0909627432

DEDICATORIA

Este trabajo de titulación está dedicado a mi padre Jaime Bolivar Mesias Alegria, por las enseñanzas sobre disciplina, responsabilidad y ética; a mi madre Emma Velasco Gruezo, por su amor inmenso, su cuidado y apoyo sin igual para asegurar mi bienestar en el transcurso de todos estos años de estudios universitarios.

Finalmente agradezco a mi abuelo Jose Bolivar Mesias y mi hermana Maria Alexandra Borja Velasco por su confianza absoluta que me ha impulsado a seguir adelante y quienes siempre han cuidado de mí.

Kevin Andres Mesias Velasco

Este trabajo de titulación está dedicado a mi madre Betty Graciela Jara Ruela, quien es el motor de mi vida y gracias a su esfuerzo y gran sacrificio lograré terminar mis estudios universitarios. A mi padre John Andres Coello Muñoz quien me inspiró a estudiar esta carrera, me enseñó a trabajar arduamente para conseguir y lograr todos mis objetivos, quien en vida me enseñó lo importante que es la perseverancia y lo duro que puede ser la vida, pero a pesar de la dificultad mientras exista un rayo de luz nada malo pasara. Ambos me guiaron con su amor y perseverancia a lo largo de mi vida. A mis hermanos quienes además de mis padres son las personas que más amo en mi vida y quienes al igual que mis padres han estado en todo momento en cada paso que he dado como también en cada caída.

Dedico esta investigación a toda mi familia, que me han enseñado que el mejor regalo que se puede dar en la vida es la educación, el cual es un puente que nos permite aprender e innovar a nuevos mundos en donde los sueños son posibles.

Francisco Javier Coello Jara

AGRADECIMIENTO

Agradezco principalmente a Dios, a mi padre y madre por su amor incondicional y por inculcarme el valor de la perseverancia para afrontar los retos y dificultades de la vida.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana, a los docentes y a mis compañeros por formar importante del desarrollo y cumplimiento del presente trabajo de investigación.

Agradezco además de manera especial al Ing. Franklín Kuonquí por su guía ante la realización de este proyecto con sugerencias y por la confianza brindada para culminar el mismo.

Kevin Andres Mesias Velasco

Agradezco a los docentes de la carrera de ingeniería en mecánica que han formado parte de mi formación profesional, quienes con su conocimiento y su apoyo brindaron las herramientas para un futuro exitoso como un ingeniero mecánico.

Agradezco a todas esas amistades que me dio directamente como indirectamente la universidad, porque me han demostrado ser grandes seres humanos que siempre me han brindado de su apoyo aun cuando fue difícil avanzar, por acompañarme y hacer de este camino más agradable y enriquecedor.

Francisco Javier Coello Jara

RESUMEN

El presente proyecto tiene como objetivo la implementación de un prototipo didáctico para la realización de prácticas de ingeniería en control. Este sistema se basa en un modelo de Horno Industrial, que es uno de los modelos nuevos más sencillos para introducción y diseño de controladores de sistemas dinámicos que son muy complejos de estabilizar, tomando en cuenta que existe frente a un 12–15 % característicos de los controles clásicos.

Para la implementación de este prototipo, se cuenta con un sistema de cerramiento térmico que permita la regulación de la temperatura a un valor deseado y con un monitoreo en tiempo real. Además, el sensor de temperatura indica el valor dentro del horno y se compara con el punto de referencia, para que el controlador en MATLAB pase los datos requeridos al Arduino Mega.

Finalmente, cuando el horno está en un punto determinado de calor se da la orden para que pare el SSR de mandar pulsos a la resistencia correspondiente.

Por último, se diseño y programo un controlador con su interfaz: un panel de control visual, con su respectivo termómetro en tiempo real. Para el diseño de este controlador, se realizaron los cálculos y simulaciones en MATLAB.

Palabras claves: sistemas de control, Horno Industrial, Panel de Control, Lógica Difusa, alimentación en resistencia y fuente, re ubicación de cableados, MATLAB, Arduino MEGA, SSR.

ABSTRACT

This project aims to implement a didactic prototype for conducting engineering control exercises. This system is based on an industrial oven model, one of the simplest new models for introducing and designing controllers for dynamic systems that are very complex to stabilize, considering the 12-15 % characteristic of traditional controls.

For the implementation of this prototype, a thermal enclosure system is used to regulate the temperature to a desired value and provide real-time monitoring. Additionally, the temperature sensor indicates the temperature inside the oven and compares it to a reference point, allowing the MATLAB controller to send the required data to the Arduino Mega.

Finally, when the oven reaches a specific temperature, a signal is sent to stop the SSR from sending pulses to the corresponding resistor.

Lastly, a controller with its interface was designed and programmed: a visual control panel with a real-time thermometer. The calculations and simulations for the design of this controller were performed in MATLAB.

Keywords: control systems, Industrial Oven, Control Panel, Fuzzy Logic, resistor and source power supply, wiring relocation, MATLAB, Arduino MEGA, SSR.

ÍNDICE

I. Problema	2
II. Justificación	3
III. Objetivos	4
III-A. Objetivo General	4
III-B. Objetivos Específicos	4
IV. Marco Teórico	5
IV-A. Diseño	5
IV-B. Bisagra metálica	7
IV-C. Manigueta metálica	8
IV-D. Fuente de alimentación	10
IV-E. Plataforma de desarrollo con microcontrolador	11
IV-F. Relé de estado sólido	13
IV-G. Disipadores de calor	14
IV-H. Sensor de Temperatura	16
IV-I. Transmisor universal	17
IV-J. Tratamientos del acero	19
IV-K. Controladores	22
IV-L. Controlador PID	24
IV-M. Lógica difusa	24
IV-N. PID con lógica difusa	25
IV-Ñ. Procedimiento metodológico para el diseño del FLS	26
IV-O. Termodinámica	27
IV-O1. Propiedades de un sistema	27
IV-O2. Estados de Equilibrio y Procesos Térmicos	28
IV-P. Transferencia de calor	28
IV-Q. Mecanismos de Transferencia de Calor	29
IV-Q1. Conducción	29
IV-Q2. Convección	30
IV-Q3. Radiación	30
IV-R. Aislamiento térmico	31
IV-R1. Primera Ley de la Termodinámica	32
IV-R2. Balance de Energía para Sistemas Cerrados	33
V. Marco Metodológico	35
V-A. Análisis Térmico	35
V-B. Diseño Mecánico	38
V-B1. Selección de Materiales	38
V-B2. Cálculos Estructurales	38
V-C. Diseño Eléctrico y Electrónico	41
V-C1. Sensor y transmisor	41
V-C2. Actuador térmico	43
V-C3. Interfaz de Control - Fuerza	45
V-D. Sistema de Control	45
V-D1. Desarrollo del Algoritmo	46
V-D2. Interfaz	52
V-E. Guía de Práctica	54
V-E1. Pruebas de Funcionamiento	55

VI. Resultados	57
VI-A. Configuración del Sistema de Control Difuso en MATLAB	57
VI-A1. Implementación del modelo en Simulink	57
VI-B. Interfaz Gráfica de Usuario	59
VI-B1. Pantalla de bienvenida	59
VI-B2. Panel principal de control	60
VI-C. Respuesta del Sistema Implementado	64
VI-C1. Características de desempeño medidas	65
VI-C2. Validación del control	66
VI-D. Discusión de Resultados	66
VI-E. Validación de Prácticas con Estudiantes	67
VII. Cronograma	72
VIII. Presupuesto	73
IX. Conclusiones	74
X. Recomendaciones	75
Anexo	76
Referencias	88

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Diagrama del proceso de diseño [7]	5
2.	Diagrama de criterios del diseño	6
3.	Bisagra metálica	8
4.	Manigueta metálica	9
5.	Fuente de alimentación estabilizada 24V (Siemens PM-1207)	11
6.	Arduino-Mega-2560-R3.2	12
7.	Relé de Estado Sólido (SSR-60DA)	14
8.	Disipador de calor	15
9.	Transmisor de Temperatura PT100	17
10.	Transmisor Universal (PR 4116)	18
11.	Tipos de tratamiento para el acero	21
12.	Ejemplo de un sistema control	22
13.	Ejemplo de Circuito Abierto y Circuito Cerrado	23
14.	Los 3 ejemplos de transferencia de calor [14]	29
15.	Esquema que muestra la primera ley de la termodinámica	33
16.	Análisis FEM del horno en SolidWorks Simulation. Por Autores	39
17.	Prototipo de horno modelado en SolidWorks. Por Autores	39
18.	Taladrado del horno industrial. Por Autores	40
19.	Esquema eléctrico general de control y potencia diseñado en CADe_SIMU. Por Autores	41
20.	Montaje interno del gabinete: Transmisor PR4116, fuente y ventilación. Por Autores	43
21.	Resistencia de Nicrom (NiCr) enrollada en espiral. Por Autores	44
22.	Funciones de membresía de la variable de entrada (Error). Por Autores	48
23.	Funciones de membresía de la variable de entrada (DeltaError). Por Autores	50
24.	Funciones de membresía de la variable de salida (ControlSSR). Por Autores	51
25.	Editor para la interfaz. Por Autores	53
26.	Editor para la interfaz. Por Autores	54
27.	Diagrama de Flujo del algoritmo de control difuso. Por Autores	56
28.	Diagrama de bloques del sistema de control difuso implementado en Simulación. Por Autores	57
29.	Pantalla de bienvenida del sistema de control difuso. Por Autores	59
30.	Panel principal de control del sistema con termómetro visual, editor de reglas difusas y gráfica en tiempo real. Por Autores	60
31.	Curva de respuesta del sistema con controlador difuso para un setpoint de 70°C	64
32.	Validación experimental del control difuso por el estudiante 1	68
33.	Análisis de la respuesta transitoria por el estudiante 2	69
34.	Pruebas de sincronización de reglas realizadas por el estudiante 3	70
35.	Elaborado por Extras	72
36.	Plano de ensamble general isométrico del horno, diseñado en SolidWorks. Por Autores	76
37.	Plano dimensional del cuerpo principal del horno. Por Autores	77
38.	Plano de fabricación de la tapa del horno. Por Autores	78
39.	Plano de detalle de la cara frontal (marco). Por Autores	79
40.	Plano de la pared posterior/lateral del recubrimiento. Por Autores	80
41.	Muestra del horno 1. Por Autores	81
42.	Muestra del horno 2. Por Autores	82
43.	Recubrimiento interno con fibra cerámica para aislamiento térmico. Por Autores	83
44.	Proceso de calibración y ensamblaje. Por Autores	84
45.	Conexiones físicas en el Arduino Mega 2560. Por Autores	84
46.	Guía de Practica - Pagina 1: Objetivos y Marco Teórico	85
47.	Guía de Practica - Pagina 2: Procedimiento y Configuración	86
48.	Guía de Practica - Pagina 3: Resultados esperados y Cuestionario	87

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Características técnicas de las bisagras industriales	7
II.	Tabla de Temperatura de un Horno Industrial	19
III.	Resumen rápido de las tres ecuaciones	31
IV.	Comparación de costos y rendimiento de aislantes térmicos	32
V.	Resumen del análisis térmico del prototipo.	37
VI.	Comparativa técnica de materiales para la carcasa exterior.	38
VII.	Matriz de Inferencia Difusa (Reglas de Control).	51
VIII.	Características de desempeño del sistema de control difuso implementado	66
IX.	Tabla de Presupuesto	73

INTRODUCCIÓN

En el contexto actual de la automatización industrial, la formación práctica de ingenieros en sistemas de control térmico es una necesidad crítica, ya que existe importantes aperturas entre los conocimientos teóricos de las aulas y su aplicación en entornos profesionales.

En respuesta a este problema, el trabajo de grado actual desarrolló un prototipo de horno industrial de bajo costo controlado por la lógica difusa, con el fin de enriquecer la experiencia práctica de los estudiantes del grado, integrando mecánica, el sistema eléctrico y el software se transforman en un sistema modular y accesible.

Las pruebas que se verán confirmadas más adelante, demuestra la eficacia del prototipo como ayuda docente porque la interfaz gráfica diseñada por MATLAB permite a los estudiantes interactuar con el controlador en tiempo real, ayudándoles a comprender la naturaleza dinámica del sistema de control térmico.

I. PROBLEMA

A nivel mundial, la industria demanda cada vez más profesionales capacitados en automatización de procesos térmicos. Según datos del sector industrial, en 2021 la demanda de profesionales en automatización aumentó un 20 % respecto al año anterior, proyectándose la necesidad de 100,000 profesionales para 2023, y se estima que para 2024 la demanda alcanzará los 120,000 profesionales [1]. Según un estudio, menos del 23.5 % de las instituciones poseen equipos para prácticas de laboratorio relacionados con los sistemas de control térmico real en sus laboratorios. Esta situación limita la formación práctica en el área de control, impidiendo que los estudiantes comprendan comportamientos dinámicos de procesos térmicos, los cuales son fundamentales en la industria, generando una brecha entre la teoría y la aplicación en el entorno profesional [1].

En los laboratorios educativos, no se dispone de un horno industrial que permita simular condiciones térmicas reales a través de un sistema de control. No existen controladores de lógica difusa implementados para fines didácticos, lo que dificulta el aprendizaje práctico de técnicas avanzadas de control [2]. A pesar de que los estudiantes adquieren conocimientos teóricos en el aula sobre modelos de control PID o ON-OFF, no cuentan con la posibilidad de comprobar en tiempo real cómo un sistema inteligente mejora la estabilidad térmica y optimiza el consumo energético. Esta ausencia de equipos limita el desarrollo de capacidades analíticas y experimentales en el campo de control [3].

La implementación de controladores difusos conlleva desafíos técnicos significativos, tales como el diseño óptimo de la base de reglas de inferencia, la sintonización precisa de los parámetros del controlador y su correcta integración con la arquitectura de hardware preexistente. Abordar estas complejidades no solo garantiza una regulación térmica superior, sino que dota al sistema de la robustez necesaria para operar bajo condiciones dinámicas variables, marcando un progreso relevante en la automatización de procesos. En consecuencia, la investigación en control difuso se establece como una necesidad imperativa para maximizar la eficiencia operativa y la confiabilidad en el ámbito industrial [4].

La incorporación de un horno industrial controlado por lógica difusa en el laboratorio representaría una mejora tanto académica como tecnológica. La construcción de un prototipo físico permitiría reproducir de manera controlada los fenómenos de calentamiento y enfriamiento, evaluar la eficiencia energética y aplicar la lógica difusa para optimizar el rendimiento del sistema. Sin este dispositivo, no es posible realizar prácticas reales de control térmico adaptativo ni analizar el comportamiento dinámico de un sistema inteligente en condiciones experimentales [5].

II. JUSTIFICACIÓN

Con el desarrollo del presente proyecto, se espera incrementar las oportunidades de prácticas reales en el laboratorio de automatización, fortaleciendo el aprendizaje experimental. Actualmente, más del 70 % de las actividades prácticas se basan en simulaciones teóricas, por lo que la incorporación de un prototipo de horno industrial con lógica difusa permitirá integrar la teoría con la práctica en un entorno controlado con métricas reales y alcanzables [4].

Los métodos tradicionales no ofrecen resultados precisos en sistemas con alta inercia térmica, pero la implementación de la lógica difusa permitirá controlar la temperatura de manera continua y adaptativa, mejorando la precisión y estabilidad del sistema. Con este enfoque, se optimiza el consumo de energía y se obtiene un rendimiento más eficiente, reduciendo errores por sobrecalentamiento o enfriamiento excesivo, problemas frecuentes en los sistemas convencionales de control [5].

Este proyecto es altamente eficiente y didáctico, ya que permitirá a los estudiantes diseñar, programar y analizar diferentes estrategias de control sobre un mismo equipo físico. Además, el uso de materiales de bajo costo y fácil adquisición en el mercado local, como resistencias eléctricas estándar, termocuplas tipo K y controladores comerciales, hace que el prototipo sea económicamente viable y replicable para futuras implementaciones [2]. El prototipo se convierte así en una herramienta versátil que contribuye directamente al fortalecimiento del aprendizaje práctico y al desarrollo de competencias técnicas alineadas con las exigencias laborales [1]. Un aspecto del control difuso es el afinamiento de la base de reglas y de las funciones de pertenencia donde los autores resolvieron mediante metodología híbrida, diseñando la base inicial con sus conocimientos expertos de operadores industriales y, posteriormente, aplicando refinamiento automático [6].

La construcción de este horno industrial con lógica difusa permitirá prácticas de laboratorio, donde los estudiantes podrán observar y medir en tiempo real el comportamiento del sistema ante perturbaciones, fortaleciendo su formación práctica en control térmico. La integración de sensores de temperatura, actuadores y un controlador que permitirá comprobar cómo la lógica difusa mejora el rendimiento térmico, facilita la estabilidad del sistema y demuestra el potencial de la automatización inteligente aplicada a procesos industriales reales [5].

III. OBJETIVOS

III-A. Objetivo General

Desarrollar un prototipo de horno industrial con control difuso de la temperatura, utilizando elementos de bajo costo que permita la realización de prácticas de laboratorio.

III-B. Objetivos Específicos

- Diseñar las etapas mecánicas, eléctricas y electrónicas considerando componentes de bajo costo.

- Implementar un prototipo de horno industrial con una interfaz de usuario para control automatizado de temperatura.

- Validar el funcionamiento del prototipo mediante la experimentación de estudiantes de pregrado por medio de 3 prácticas de laboratorio.

IV. MARCO TEÓRICO

IV-A. Diseño

El diseño puede entenderse como un proceso integral que abarca la creación, desarrollo y materialización de productos, sistemas, servicios o procedimientos destinados a satisfacer una necesidad concreta o percibida, dentro de ciertos parámetros o limitaciones. Para llevarlo a cabo, suele ser necesaria la integración de principios, saberes, métodos, herramientas y destrezas provenientes de diversas áreas del conocimiento, según el tipo de diseño que se realice. En términos generales, el proceso de diseño inicia con una idea y culmina con un conjunto de planos, bocetos o modelos digitales que posibilitan la fabricación y el uso del producto final [7].

El diseño constituye un proceso que requiere planificación y desarrollo cuidadoso. En la Figura 1 se presenta un esquema de las etapas que deben seguirse durante dicho proceso. Como puede apreciarse, algunas fases deben repetirse varias veces con el fin de perfeccionar progresivamente el diseño y lograr que se convierta en una solución óptima al problema o necesidad identificada.

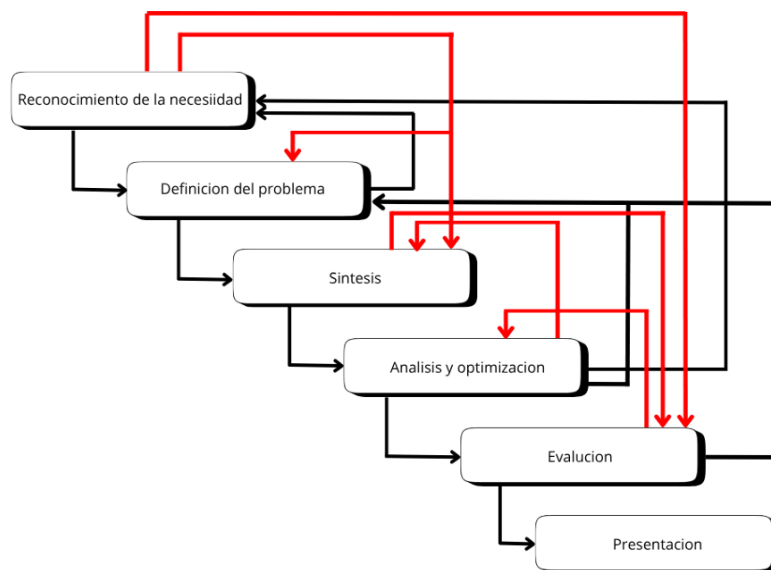


Figura 1. Diagrama del proceso de diseño [7]

El primer paso consiste en identificar una necesidad, lo cual no siempre resulta sencillo, ya que en ocasiones esta no se manifiesta de forma evidente. Posteriormente, se procede a la definición del problema, etapa en la que

se establecen las especificaciones del objeto a diseñar. Dichas especificaciones abarcan aspectos como el costo, la vida útil esperada, la confiabilidad, la cantidad a producir y la temperatura de operación, además de considerar las variables de entrada y salida, las características, dimensiones y posibles limitaciones del diseño [8].

La síntesis corresponde a la etapa en la que se integran las ideas generadas con el propósito de desarrollar un concepto capaz de responder eficazmente a los requerimientos del diseño. En la fase de análisis, se emplean conocimientos de ingeniería como la estadística, la mecánica de materiales o la estática con el fin de evaluar el diseño y obtener información cuantitativa relevante. Luego, durante la optimización, se perfeccionan de manera reiterada ciertos criterios específicos para alcanzar el mejor resultado posible. Finalmente, en la fase de evaluación, se determina si el diseño cumple con las especificaciones iniciales; en caso contrario, se repiten las etapas de revisión y ajuste hasta lograr el resultado esperado [9].

Al momento de desarrollar un diseño, es fundamental tener en cuenta diversos factores conocidos como consideraciones de diseño, los cuales influyen directamente en la calidad, funcionalidad y viabilidad del producto o sistema. Entre estos factores se incluyen aspectos como los mostrados en la Figura 2 [10].



Figura 2. Diagrama de criterios del diseño

Por otro lado, al llevar a cabo un diseño, es esencial considerar las normas y los códigos aplicables. Según Budynas y Nisbett, una norma se define como “un conjunto de especificaciones referentes a partes, materiales o procesos, establecidas con el propósito de alcanzar uniformidad, eficiencia y calidad determinadas”. De igual forma, el término código se describe como “un conjunto de especificaciones destinadas al análisis, diseño, fabricación y construcción de un producto o sistema” [8].

Durante el proceso de diseño, es recomendable aprovechar al máximo el uso de tamaños y componentes estándar, ya que estos son más accesibles y económicos. En cambio, optar por dimensiones especiales o poco comunes eleva los costos, debido a que requieren fabricación personalizada y pueden implicar mayores tiempos de entrega. Además, resulta conveniente consultar a los proveedores locales para verificar la disponibilidad de materiales o piezas, puesto que en muchos casos los productos encontrados en línea pueden presentar dificultades de importación o demoras en su adquisición [11].

IV-B. Bisagra metálica

La bisagra metálica es un componente mecánico de articulación utilizado para permitir el movimiento rotacional entre dos elementos estructurales. En particular, la bisagra mostrada en la Figura 3 es un tipo de bisagra *butt hinge*, comúnmente utilizada para unir puertas o paneles en entornos industriales.

A continuación, en la Tabla I, se detallan las características técnicas principales de las bisagras seleccionadas para este tipo de aplicaciones, considerando los requerimientos de carga y ambiente.

Tabla I
CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS DE LAS BISAGRAS INDUSTRIALES

Característica	Detalle
Materiales comunes	Acero inoxidable (AISI 304), latón y bronce
Tipos principales	Butt hinge (tope), piano (continua), strap hinge, resorte
Capacidad de carga	Hasta 50 kg (ligeras) y >100 kg por par (pesadas)
Ángulo de apertura	Típicamente hasta 180° o superior
Acabados	Galvanizado, pulido satinado o pintado
Montaje	Pasador fijo o removible, con barril elevado



Figura 3. Bisagra metálica

IV-C. Manigueta metálica

Las maniguetas metálicas industriales son elementos de interfaz humano-máquina diseñados para facilitar el agarre, manipulación, operación y control manual de equipos, máquinas, puertas, paneles y mecanismos industriales. A diferencia de los pomos fijos o botones, las maniguetas proporcionan palancas ergonómicas que maximizan la fuerza aplicable por el operador mediante ventaja mecánica, permitiendo accionar mecanismos pesados, rotar ejes, abrir compuertas o ajustar posiciones con menor esfuerzo físico.

La manigueta metálica de la Figura 4 es un asa ergonómica diseñada para aplicaciones industriales, como en maquinaria, gabinetes eléctricos o contenedores, facilitando el agarre seguro para abrir, cerrar o manipular equipos. Fabricada en materiales como aleación de zinc, acero inoxidable o aluminio, ofrece resistencia a la corrosión, impactos y altas temperaturas.

Desde el punto de vista del diseño, su configuración puede ser de tipo palanca (lever), manivela (crank) o tirador (pull), con agarres ergonómicos para reducir fatiga en usos repetitivos. En entornos industriales, las maniguetas se emplean principalmente para la manipulación de puertas de máquinas, levantamiento de paneles o ajuste de equipos, incorporando variantes anodizadas para mayor durabilidad.

En cuanto a sus especificaciones técnicas, las longitudes varían de 100 a 300 mm, soportando cargas de hasta 100 kg. Además, algunas incluyen mecanismos de bloqueo integrados para garantizar la seguridad operacional. Por otra parte, materiales como el acero cromado proporcionan un acabado elegante, mientras que el aluminio ofrece ligereza combinada con buena conductividad térmica.

Finalmente, la elección apropiada de una manigueta depende de múltiples factores, incluyendo la ergonomía requerida, el entorno ambiental de operación y los requisitos de higiene específicos, con guías técnicas que recomiendan realizar pruebas de carga para verificar la compatibilidad con la aplicación prevista [9], [11].



Figura 4. Manigueta metálica

IV-D. Fuente de alimentación

La fuente de alimentación es el componente electrónico encargado de convertir la corriente alterna de la red eléctrica (típicamente 110/220 V AC) en corriente continua de bajo voltaje (DC), necesaria para la operación de los circuitos electrónicos. Este dispositivo no solo reduce la tensión, sino que también la rectifica, filtra y estabiliza para entregar una salida constante y segura, protegiendo así a los componentes sensibles contra fluctuaciones de la red.

En términos generales, las fuentes se clasifican principalmente en lineales y conmutadas. La fuente de alimentación conmutada (SMPS, *Switched-Mode Power Supply*) utiliza conmutación de alta frecuencia (20–500 kHz) mediante transistores como MOSFETs o IGBTs para transformar el voltaje con una eficiencia del 85–95 %, siendo significativamente superior a las fuentes lineales (50–60 %). A diferencia de estas últimas, que disipan el exceso de voltaje en forma de calor, las SMPS son más compactas, ligeras y permiten rangos de entrada universales (90–264 V AC) sin necesidad de grandes transformadores.

Para el desarrollo de este prototipo, se seleccionó el modelo PM 1207 de Siemens, ilustrado en la Figura 5. Se trata de una fuente de alimentación estabilizada diseñada específicamente para la automatización industrial y la alimentación de PLCs (como la serie S7-1200). Este dispositivo acepta un rango de entrada de 120/230 V AC y entrega una salida regulada de 24 V DC con una capacidad de corriente de 2.5 A, proporcionando una potencia total de 60 W [1].

Desde el punto de vista de su integración y seguridad, la PM 1207 cuenta con un diseño para montaje en riel DIN, lo que facilita su instalación en gabinetes de control. Incluye protecciones integradas contra cortocircuitos y sobrecargas, garantizando la integridad del sistema ante fallos. Además, está certificada para operar en entornos industriales con temperaturas de -20 °C a +70 °C, asegurando un suministro de energía fiable y continuo para los sensores y el sistema de control [12].



Figura 5. Fuente de alimentación estabilizada 24V (Siemens PM-1207)

IV-E. Plataforma de desarrollo con microcontrolador

Una plataforma de desarrollo con microcontrolador es una placa electrónica que integra un microchip programable (el “cerebro” del sistema) junto con los circuitos de soporte necesarios como reguladores de voltaje, osciladores y puertos de comunicación, facilitando la creación de prototipos sin necesidad de diseñar el hardware desde cero.

En términos generales, las placas tradicionales de Arduino, como Uno y Nano, usan el ATmega328P con 14 pines digitales y 6 analógicos, siendo ideales para proyectos básicos y medianos. Por el contrario, el Arduino Mega 2560, basado en el ATmega2560, ofrece 54 pines digitales (15 con PWM), 16 entradas analógicas y 4 puertos UART, lo que lo hace mucho más potente para proyectos complejos, por lo cual es claramente superior cuando se necesita conectar muchos sensores, módulos, shields o actuadores al mismo tiempo sin quedarse sin pines disponibles.

En particular, el Arduino Mega 2560 Rev3 presentado en la Figura 6 es una placa de microcontrolador de 8 bits basada en el ATmega2560, ideal para proyectos que requieren muchas entradas/salidas. Desde el punto de vista técnico, cuenta con 54 pines digitales (15 con PWM) y 16 pines analógicos, operando a 16 MHz con voltaje lógico de 5 V. En cuanto a su memoria, incluye 256 KB de flash, 8 KB de SRAM y 4 KB de EEPROM. Además,

dispone de 4 puertos UART, interfaz I2C, SPI y conexión USB nativa para programación y comunicación. Cabe destacar que es compatible con la mayoría de shields de Arduino Uno (con ajustes en pines I2C). Por otra parte, sus dimensiones aproximadas son 101.52×53.3 mm, con un peso de 37 g. Asimismo, incluye LED integrado en pin 13, botón de reset y soporte para programación ICSP.

Es ampliamente usado en robótica, domótica, adquisición de datos y prototipos complejos. Finalmente, la programación se realiza mediante el IDE de Arduino, con bootloader preinstalado que facilita la carga de código directamente vía USB [4], [5].

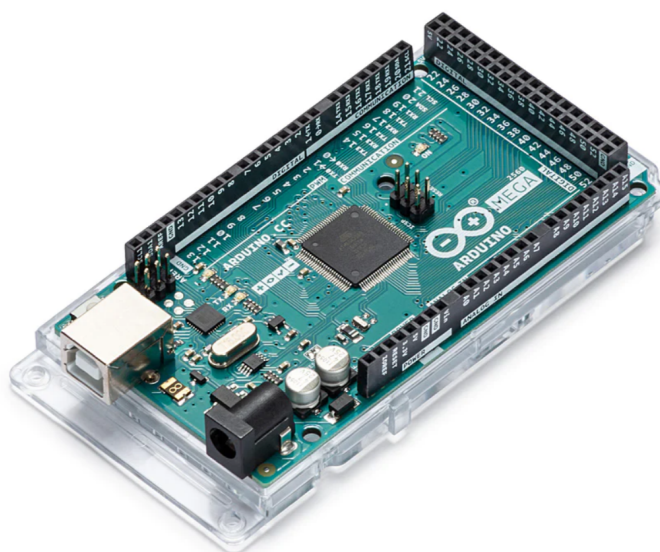


Figura 6. Arduino-Mega-2560-R3.2

IV-F. Relé de estado sólido

Un relé de estado sólido (conocido como SSR por sus siglas) es un interruptor electrónico que cumple la misma función que un relé electromecánico tradicional, pero sin ninguna parte móvil. En lugar de usar un electroimán y contactos mecánicos que se abren y cierran físicamente (como los relés clásicos), el SSR utiliza componentes semiconductores (como triacs, tiristores, MOSFET o transistores de potencia) para conectar o desconectar una carga eléctrica.

Dentro de esta categoría, el SSR-40DA es un relé de estado sólido de capacidad media que conmuta cargas AC de hasta 40 A (8.8 kW a 220 V) mediante control DC de 3–32 V, utilizando optoacoplador para aislamiento galvánico y tiristores SCR para conmutación por cruce por cero que minimiza interferencias electromagnéticas. Es ampliamente utilizado en aplicaciones industriales de potencia moderada como calentadores eléctricos de hasta 8 kW, motores monofásicos pequeños, control de iluminación escénica y equipos de laboratorio, donde la capacidad del SSR-30DA (30 A / 6.6 kW) resulta insuficiente pero el SSR-60DA (60 A / 13.2 kW) sería sobre dimensionado y más costoso.

En particular, el SSR-60DA de la Figura 7 es un relé de estado sólido (Fotek o similar) diseñado para conmutar cargas AC usando una señal de control DC, sin contactos mecánicos, lo que garantiza una vida útil muy larga. Desde el punto de vista de sus especificaciones, la entrada de control es de 3–32 V DC y la salida soporta 24–480 V AC hasta 60 A.

Además, incluye conmutación por cruce por cero para minimizar interferencias electromagnéticas y un LED indicador de activación. Asimismo, ofrece alta resistencia dieléctrica (mayor a 4 kV) y aislamiento óptico para seguridad operacional. Cabe destacar que se recomienda usar disipador de calor para corrientes superiores a 10 A, ya que genera calor por conducción. Por otra parte, presenta un tiempo de respuesta rápido (8–10 ms), lo que lo hace ideal para aplicaciones de control preciso.

En cuanto a sus aplicaciones, es muy usado en control industrial de calentadores, motores, iluminación y cargas

resistivas/inductivas. Una ventaja importante es que no produce chispas ni ruido mecánico, siendo ideal en entornos con alta frecuencia de conmutación. Sin embargo, requiere ventilación adecuada y protección contra sobrecorriente para garantizar operación segura. Finalmente, existen variantes que incluyen modelos con detección de fallo o salida analógica para aplicaciones más especializadas [4], [13].



Figura 7. Relé de Estado Sólido (SSR-60DA)

IV-G. Disipadores de calor

Un disipador de calor es un componente pasivo que transfiere el calor generado por dispositivos electrónicos hacia el ambiente mediante conducción, distribución por aletas de aluminio (150–235 W/(m·K)) o cobre (400 W/(m·K)), y disipación por convección. Su eficiencia se mide mediante resistencia térmica (R_{θ}) en °C/W, donde la ecuación térmica es $T_j = T_a + (P_{\text{diss}} \times R_{\theta ja})$. Se clasifican en pasivos (convección natural, ≤ 50 W) y activos (con ventiladores, ≤ 100 W, $R_{\theta} = 0.1\text{--}0.5$ °C/W).

Los disipadores para Raspberry Pi son componentes de aluminio que enfrían el procesador ARM, RAM y controladores. El Raspberry Pi 4 disipa 5–8 W alcanzando 80–85 °C sin refrigeración, causando throttling de 2.0 GHz a 1.3 GHz. Los kits incluyen tres piezas: CPU/GPU (14 × 14 × 6 mm), RAM (9 × 9 × 4 mm) y Ethernet/USB (8 × 8 × 5 mm), reduciendo la temperatura a 70–75 °C.

Los SSR generan calor por caída de voltaje según $P_{\text{diss}} = I_{\text{carga}} \times V_{\text{drop}}$ (ejemplo: SSR-60DA a 45 A disipa 67.5 W). Los disipadores de aluminio 6063 (201–218 W/(m·K)) se dimensionan según corriente: 10–40 A requieren 80 × 50 × 50 mm ($R_{\theta} = 1.5\text{--}2.5 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$), 60–100 A requieren 110 × 100 × 80 mm ($R_{\theta} = 0.5\text{--}1.0 \text{ }^{\circ}\text{C/W}$). Obligatorio para corrientes ≥ 10 A con pasta térmica de alta conductividad [14].

Los disipadores de calor que se mostrados en la Figura 8 son esenciales para mantener temperaturas operacionales seguras en dispositivos electrónicos. Su selección requiere análisis térmico considerando potencia disipada y resistencias térmicas, utilizando materiales de alta conductividad. Los dispositivos más fríos duran más tiempo, siendo fundamental en aplicaciones industriales para prevenir fallos catastróficos [15].

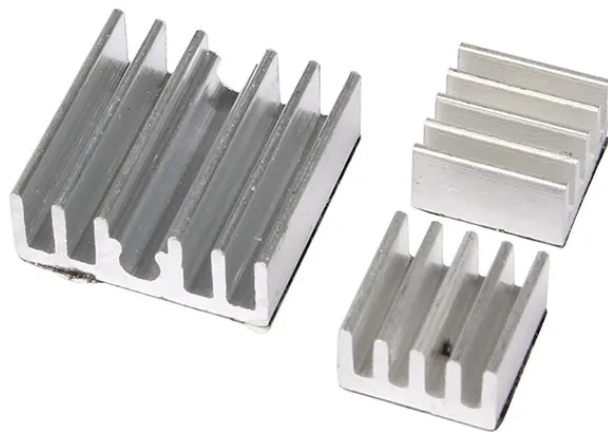


Figura 8. Disipador de calor

IV-H. Sensor de Temperatura

Un sensor de temperatura es un dispositivo que detecta y mide la temperatura de un medio (sólido, líquido o gas) y la convierte en una señal eléctrica proporcional (voltaje, corriente o resistencia). Los tipos principales incluyen termopares (generan voltaje por efecto Seebeck, rango $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+2300\text{ }^{\circ}\text{C}$), RTDs o PT100 (resistencia de platino variable, $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$, alta precisión), termistores NTC/PTC (resistencia variable no lineal, $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, bajo costo) y semiconductores como LM35 (salida de voltaje lineal $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$, fácil interfaz con microcontroladores). La selección depende del rango de temperatura requerido, precisión, tiempo de respuesta, ambiente de operación y compatibilidad con sistemas de control industrial o domésticos.

Dentro de los sensores de temperatura disponibles, el LM35 es un circuito integrado semiconductor que proporciona salida de voltaje analógico linealmente proporcional a la temperatura con sensibilidad de $10\text{ mV}/^{\circ}\text{C}$, sin requerir calibración externa. En términos de especificaciones, opera en rango de $-55\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ con precisión típica de $\pm 0.25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $25\text{ }^{\circ}\text{C}$, alimentación de $4\text{--}30\text{ V DC}$ y consumo de solo $60\text{ }\mu\text{A}$. Por estas características, es ampliamente utilizado en proyectos educativos, monitoreo ambiental y aplicaciones de bajo costo donde la simplicidad de interfaz con microcontroladores (Arduino, Raspberry Pi) es prioritaria sobre precisión extrema.

Por el contrario, el PT100 de la Figura 9 es un detector resistivo (RTD) de platino con resistencia nominal de $100\text{ }\Omega$ a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ que opera en rangos mucho más amplios de $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$ con precisión Clase A ($\pm 0.15\text{ }^{\circ}\text{C}$). Desde el punto de vista de su principio de funcionamiento, su resistencia aumenta linealmente con la temperatura según la norma IEC 60751, ofreciendo estabilidad a largo plazo, repetibilidad excepcional e inmunidad a ruido eléctrico.

En cuanto a su instalación, se conecta mediante configuraciones de 2, 3 o 4 hilos para compensar la resistencia de cables en mediciones remotas, siendo el estándar industrial para aplicaciones que requieren alta exactitud como hornos industriales, procesos químicos y laboratorios de calibración. Esta configuración multi-hilo garantiza mediciones precisas incluso en instalaciones donde la distancia entre el sensor y el instrumento de medición es considerable [4], [14].



Figura 9. Transmisor de Temperatura PT100

IV-I. Transmisor universal

Un transmisor universal es un dispositivo industrial programable que acepta múltiples tipos de entradas de sensores de temperatura (RTD como PT100/PT1000, termopares tipo J/K/T/E/N/R/S/B, termistores NTC) y los convierte en señales estandarizadas de salida como 4–20 mA, 0–10 V DC o protocolos digitales (HART, Modbus, IO-Link).

A diferencia de transmisores específicos, un solo modelo universal puede configurarse para diferentes tipos de sensores y rangos de temperatura, reduciendo inventario, simplificando mantenimiento y proporcionando flexibilidad en aplicaciones donde se requieren múltiples tipos de mediciones. Además, incluye funciones avanzadas como linealización automática, compensación de unión fría para termopares, detección de rotura de sensor según NAMUR NE43, calibración digital mediante software y diagnóstico integrado, siendo ideal para plantas industriales con diversos puntos de medición.

En particular, el PR 4116 como se muestra en la Figura 10 es un transmisor multifuncional de PR Electronics diseñado para convertir señales de temperatura (RTD, TC), resistencia, voltaje y corriente en salidas estandarizadas (4–20 mA, voltaje, relés). Desde el punto de vista de su instalación, presenta montaje en riel DIN, con pantalla integrada y programación mediante display 4500 o software dedicado. En cuanto a su alimentación, opera con

alimentación universal (19.2–300 V DC / 21.6–253 V AC), lo que facilita su integración en diferentes sistemas eléctricos.

Por otra parte, está certificado SIL 2 para aplicaciones de seguridad funcional y ATEX para zonas explosivas, garantizando operación segura en ambientes de alto riesgo. Asimismo, incluye aislamiento galvánico completo y protección contra ruido eléctrico para asegurar la integridad de las señales. Cabe destacar que permite funciones avanzadas como alarmas configurables, relés programables y escalado lineal/cuadrático según los requisitos del proceso.

En términos de aplicaciones, se utiliza en automatización de procesos, monitoreo de sensores, aislamiento de señales y conversión en plantas industriales. Finalmente, ofrece alta fiabilidad en entornos hostiles gracias a su diseño robusto y diagnóstico integrado que permite detección temprana de fallos y mantenimiento predictivo [4], [12].



Figura 10. Transmisor Universal (PR 4116)

IV-J. Tratamientos del acero

Antes de profundizar en los tratamientos térmicos y el proceso de temple, es fundamental comprender los principios esenciales del sistema hierro-carbono. En este sistema binario se representan los aceros y los hierros fundidos, cuyas propiedades varían según el porcentaje de carbono presente. El hierro con un contenido de carbono de hasta 0.008 % se considera hierro comercialmente puro; los aceros poseen hasta 2.11 % de carbono, mientras que los hierros fundidos pueden contener hasta 6.67 %, aunque generalmente se encuentran con valores cercanos al 4.5 %. La temperatura de fusión del hierro puro es de 1538 °C, y durante su enfriamiento se forman sucesivamente ferrita delta, austenita y, finalmente, ferrita alfa [16].

Normalmente, la ferrita es una solución sólida que el acero tiene centrada en el cuerpo (bcc), es relativamente dúctil, suave a temperatura ambiente hasta 150 °C; por otra parte, la austenita es estable solo a altas temperaturas y tiene gran importancia práctica en la ingeniería, mientras que se da cuando el metal sufre una transformación y pasa a una estructura cúbica centrada en las caras (fcc) en un margen de temperatura, resultando en que sea más densa, dúctil a altas temperaturas, posea buena formabilidad y se pueda disolver carbono de acuerdo a la Tabla II [17].

Tabla II
TABLA DE TEMPERATURA DE UN HORNO INDUSTRIAL

Temperatura del Horno		
Celsius	Fahrenheit	Descripción
25°C	77°F	Muy Frío
50°C	122°F	Frío
75°C	167°F	Moderado
100°C	212°F	Caliente
125°C	257°F	Muy Caliente
150°C	302°F	Demasiado Caliente

Los tratamientos térmicos más comunes aplicados a los aceros incluyen procesos como el normalizado, el temple y el revenido. Estos consisten en calentar un material metálico hasta una temperatura específica, mantenerlo a esa temperatura durante un tiempo determinado y posteriormente enfriarlo de manera controlada, generalmente dentro del mismo horno. Este procedimiento permite obtener una estructura más homogénea y gruesa, reduciendo la dureza del material y facilitando así las operaciones de mecanizado y conformado posterior [18].

Por otro lado, el normalizado consiste en permitir que la pieza se enfríe al aire después del calentamiento, lo que produce un material con mayor resistencia y dureza, aunque con menor ductilidad en comparación con el obtenido mediante el recocido. Este proceso también favorece una estructura interna más uniforme y contribuye a la reducción de esfuerzos residuales. De manera similar, el temple implica calentar la pieza y luego enfriarla rápidamente, con el objetivo de incrementar su dureza; en general, dicha dureza se incrementa proporcionalmente con la velocidad de enfriamiento empleada durante el proceso [18].

Otro concepto importante a tener en cuenta es el de templabilidad, que es la capacidad que tiene un acero para ser endurecido mediante temple, que también se controlan las propiedades finales del acero reduciendo su dureza y aumentando la tenacidad, el cual se lo realiza calentando la pieza nuevamente, pero a una temperatura menor que la de temple y dejándola enfriar de manera lenta y controlada [17], [18].

Los esfuerzos residuales y el agrietamiento que pueden presentarse durante el proceso de temple se originan por los efectos de expansión y contracción térmica. Al templar un acero, la superficie externa se enfría más rápidamente que el núcleo, lo que provoca que la transformación estructural ocurra primero en el exterior y luego en el interior. Esta diferencia genera tensiones en la superficie endurecida, aumentando el riesgo de grietas por temple.

Asimismo, es fundamental controlar la velocidad de enfriamiento, la cual depende de factores como la diferencia de temperatura entre la superficie y el centro de la pieza, la conductividad térmica del medio de enfriamiento y la temperatura del mismo. Para mejorar la transferencia de calor, se recomienda agitar la pieza dentro del medio de temple, lo que ayuda a romper la capa de vapor que se forma alrededor del material y permite un contacto más

directo con el líquido frío. Los fluidos más utilizados en este proceso son el aceite, el agua y la salmuera, cada uno con características específicas de enfriamiento según el tipo de acero y el grado de dureza deseado [18].

Por otro lado, existen tratamientos superficiales los cuales generan piezas con superficies duras y fuertes, aptas para situaciones de desgaste y fatiga, pero con núcleos blandos, dúctiles y tenaces ideales para situaciones donde se requiera resistencia a impactos de la Figura 11 [19].

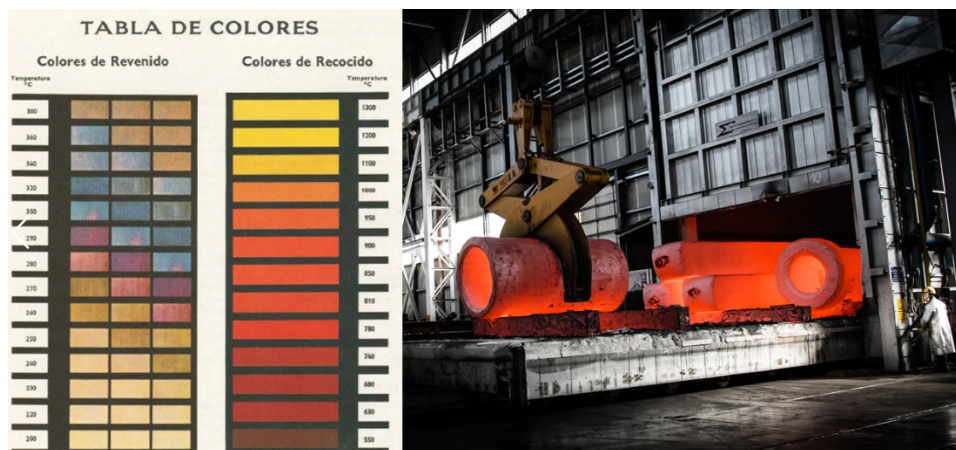


Figura 11. Tipos de tratamiento para el acero

IV-K. Controladores

Los sistemas de control como el representado en la Figura 12, están constituidos por diversos subsistemas y plantas interconectados con el propósito de regular las salidas de los procesos [12]. En términos simples, estos sistemas responden a una entrada o estímulo generando una salida o respuesta acorde con lo esperado. Además, son los encargados de analizar las variables del sistema y enviar señales a los componentes correspondientes para mantener dichas variables dentro de los valores establecidos.

Los principales objetivos de los sistemas de control son obtener una respuesta transitoria adecuada, minimizar el error en estado estable y garantizar la estabilidad del sistema [20].

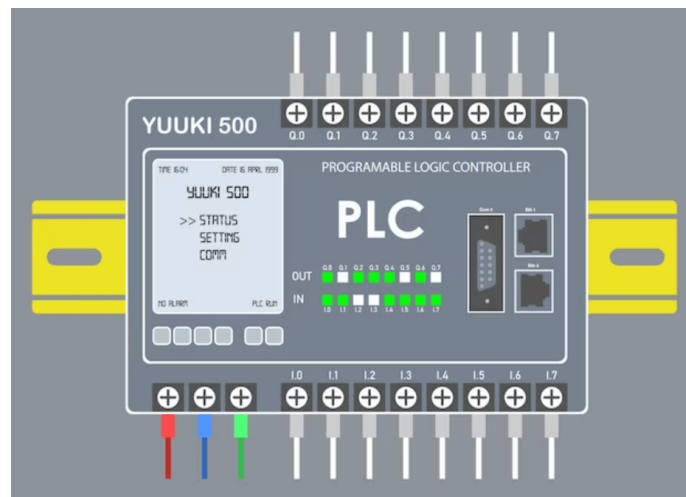


Figura 12. Ejemplo de un sistema control

Los controladores de temperatura son dispositivos encargados de regular la temperatura y lo pueden hacer con diferentes niveles de precisión al estar compuestos por sensores como termocuplas, RTDs o termistores los cuales se encargan de obtener información la cual es comparada con una referencia, para que así el controlador active una señal de salida en donde un elemento de calentamiento está conectado [21]. Generalmente, los controladores usados para temperatura son: controladores On/Off, controladores proporcionales y controladores PID [22].

Los controladores On/Off operan mediante dos estados básicos: encendido y apagado. Su funcionamiento se basa en que, cuando la temperatura del sistema supera el valor deseado, el controlador se apaga o activa el enfriamiento;

por el contrario, cuando la temperatura cae por debajo del valor establecido, el controlador se enciende o activa el calentamiento. Sin embargo, este tipo de control presenta limitaciones en precisión, ya que puede generar altos valores de sobrerrespuesta térmica y oscilaciones significativas en torno a la temperatura objetivo, dificultando así un control estable y exacto [12].

Por otra parte, los controladores proporcionales representan una versión más avanzada de los sistemas On/Off, ya que operan dentro de una banda proporcional establecida alrededor de la temperatura deseada. En este tipo de control, cuando la temperatura actual se acerca al valor objetivo, el controlador disminuye gradualmente el nivel de energía suministrada, evitando así los cambios bruscos entre los estados de encendido y apagado como se ve en la Figura 13.

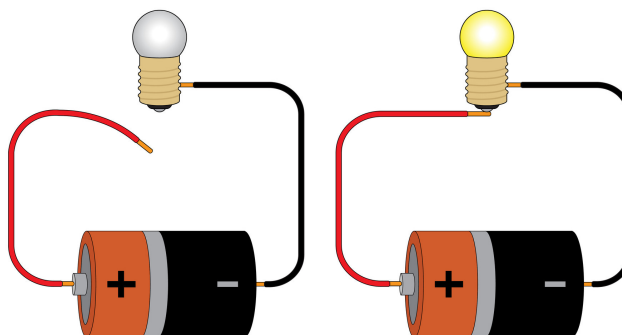


Figura 13. Ejemplo de Circuito Abierto y Circuito Cerrado

IV-L. Controlador PID

El controlador PID (*Proportional-Integral-Derivative*) es un método de control clásico ampliamente utilizado en la industria que calcula la señal de control $u(t)$ como la suma ponderada de tres términos basados en el error $e(t) = r(t) - y(t)$ entre la referencia $r(t)$ y la salida del sistema $y(t)$ [22]:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

donde:

- **Proporcional (P):** El término $K_p e(t)$ responde proporcionalmente al error actual, proporcionando acción correctiva inmediata. Un K_p alto reduce el error en estado estacionario pero puede causar sobrepaso (*overshoot*) y oscilaciones.
- **Integral (I):** El término $K_i \int e(\tau) d\tau$ acumula el error a lo largo del tiempo, eliminando el error en estado estacionario causado por perturbaciones constantes o cambios en la referencia. Sin embargo, un K_i excesivo introduce lentitud y sobrepaso.
- **Derivativo (D):** El término $K_d \frac{de(t)}{dt}$ anticipa cambios futuros del error basándose en su tasa de cambio, proporcionando amortiguamiento que reduce el sobrepaso y mejora la estabilidad. Es sensible al ruido de alta frecuencia en la medición.

El controlador PID es muy efectivo en procesos lineales y predecibles con dinámica bien caracterizada, pero puede presentar desempeño deficiente en sistemas no lineales, variantes en el tiempo o sujetos a perturbaciones significativas, requiriendo ajuste (*tuning*) cuidadoso de las ganancias K_p , K_i , K_d mediante métodos como Ziegler-Nichols, Cohen-Coon o algoritmos de optimización [12], [20].

IV-M. Lógica difusa

La lógica difusa es un método de control que imita el razonamiento humano mediante el uso de valores “parciales” en lugar de valores binarios (verdadero/falso), permitiendo representar la incertidumbre y la imprecisión inherentes en muchos sistemas reales. A diferencia de la lógica clásica booleana, la lógica difusa utiliza funciones de pertenencia

que asignan grados de verdad en el intervalo $[0, 1]$, donde 0 representa completamente falso y 1 completamente verdadero, con valores intermedios representando estados parciales de verdad [13], [25].

La lógica difusa es ideal para sistemas no lineales, inciertos o complejos donde el modelo matemático exacto es difícil de obtener o computacionalmente costoso, como: control de temperatura en hornos, vehículos autónomos, lavadoras inteligentes y sistemas de climatización, donde el conocimiento experto puede codificarse en reglas lingüísticas intuitivas sin necesidad de ecuaciones diferenciales complejas [5], [13].

IV-N. PID con lógica difusa

El controlador PID difuso (*Fuzzy PID*) es una estrategia de control híbrida que combina las ventajas de la lógica difusa y el control PID clásico para mejorar el desempeño en sistemas no lineales, variantes en el tiempo o con incertidumbre paramétrica. Existen dos enfoques principales para implementar un Fuzzy PID [22]:

1. **Ajuste difuso de ganancias:** La lógica difusa ajusta en tiempo real las ganancias K_p , K_i , K_d del controlador PID convencional en función del error $e(t)$ y su derivada $\dot{e}(t)$. El sistema difuso toma como entradas (e, \dot{e}) y produce como salidas $(\Delta K_p, \Delta K_i, \Delta K_d)$ o directamente (K_p, K_i, K_d) , adaptando la agresividad del control según la región de operación.
2. **Control difuso directo tipo PD+I o PI+D:** El controlador difuso calcula directamente las componentes proporcional y derivativa (u_{PD}) mediante reglas difusas con entradas (e, \dot{e}) , mientras que la componente integral (u_I) se calcula separadamente para eliminar error en estado estacionario. La salida final es $u(t) = u_{PD}(e, \dot{e}) + K_i \int e(\tau) d\tau$ o $u(t) = u_{PI}(e, \int e) + K_d \dot{e}(t)$.

Las ventajas del Fuzzy PID sobre el PID clásico incluyen:

- (1) Mayor robustez ante variaciones paramétricas del proceso
- (2) Reducción significativa del sobrepaso y tiempo de establecimiento
- (3) Mejor rechazo de perturbaciones sin necesidad de reajuste manual de ganancias

- (4) Manejo eficiente de no linealidades como saturación, zona muerta o histéresis
- (5) Incorporación de conocimiento experto sobre el comportamiento deseado del sistema mediante reglas lingüísticas intuitivas [26].

IV-Ñ. Procedimiento metodológico para el diseño del FLS

De acuerdo con el procedimiento metodológico para el diseño de un Sistema de Lógica Difusa (FLS), se estructura en una secuencia de nueve etapas fundamentales, se mencionan a continuación las 4 más importantes [13]:

1. **Identificación de Variables:** Consiste en determinar cuáles serán las variables de entrada y salida del sistema difuso. Las variables de entrada, también llamadas antecedentes, son las magnitudes medidas del proceso. La variable de salida o consecuente es la acción de control que el sistema debe calcular (por ejemplo, el ciclo de trabajo PWM enviado al SSR).
2. **Proceso de Fusificación:** Es el proceso mediante el cual los valores numéricos precisos (crisp) provenientes de los sensores se convierten en grados de pertenencia a conjuntos difusos. En este paso, una variable como la temperatura deja de ser un número exacto y pasa a pertenecer parcialmente a categorías lingüísticas, con un grado de membresía entre 0 y 1 definido por las funciones de pertenencia.
3. **Reglas de Inferencia:** Son el conjunto de sentencias condicionales del tipo *IF-THEN* que representan el conocimiento experto del operador humano sobre el proceso. Cada regla relaciona combinaciones de los conjuntos difusos de las variables de entrada con un conjunto difuso de la variable de salida.
4. **Proceso de Defusificación:** Es la etapa inversa a la Fusificación, donde el resultado difuso obtenido tras aplicar las reglas de inferencia se transforma nuevamente en un valor numérico preciso que puede ser enviado al actuador.

IV-O. Termodinámica

El término termodinámica proviene de las palabras griegas que significan calor y fuerza, y se ocupa del estudio de la transferencia de energía en forma de calor cuando un sistema pasa de un estado de equilibrio a otro. Asimismo, señalan que la termodinámica es la rama de la ciencia que estudia la relación entre el calor y las distintas formas de energía, incluido el trabajo mecánico. Todos los procesos de transferencia de calor se rigen por la primera y segunda ley de la termodinámica [14].

El aspecto central de la termodinámica consiste en determinar la tasa de transferencia de calor correspondiente a una diferencia de temperatura específica. Este análisis resulta esencial para evaluar la factibilidad, el costo y el dimensionamiento de los equipos necesarios para transferir calor de manera eficiente y precisa dentro de un intervalo de tiempo determinado [14].

Al analizar la primera ley de la termodinámica, se establece la aplicación del principio de conservación de la energía. En este sentido, la primera ley exige que la tasa de transferencia de energía hacia un sistema sea igual a la tasa de incremento de la energía dentro de dicho sistema. Por otro lado, la segunda ley de la termodinámica introduce la noción de que la energía posee calidad además de cantidad, y que los procesos naturales tienden a avanzar en la dirección de disminución de dicha calidad [14].

IV-O1. Propiedades de un sistema: Cuando se mencionan las características de los sistemas, se hace referencia a sus propiedades, las cuales describen su estado y comportamiento. Entre las propiedades más comunes se encuentran la presión, la temperatura, la masa, el volumen, la conductividad térmica y el coeficiente de expansión térmica, entre otras. Estas propiedades se clasifican en extensivas e intensivas [14].

1. **Propiedades intensivas:** Son aquellas independientes de la masa del sistema, tales como la temperatura, la presión y la densidad; en el diseño del horno, la temperatura es la variable intensiva crítica que el controlador busca estabilizar.

2. **Propiedades extensivas:** Dependen del tamaño o extensión del sistema, como la masa total y el volumen de la cámara.

IV-O2. Estados de Equilibrio y Procesos Térmicos: Para el análisis del horno industrial, es imperativo definir el concepto de equilibrio térmico. Se dice que un sistema se encuentra en estado de equilibrio cuando no experimenta cambios en sus propiedades intensivas y extensivas de manera espontánea. Por lo tanto, el proceso de calentamiento representa una sucesión de estados de desequilibrio controlados, donde la energía suministrada busca desplazar al sistema desde una temperatura ambiente inicial hasta un estado estacionario de operación.

IV-P. Transferencia de calor

La transferencia de energía se produce, por regla general, del medio que tiene la temperatura más alta al que tiene menor temperatura; esa transferencia se detiene cuando los medios alcanzan la misma temperatura (equilibrio térmico). El calor se manifiesta como resultado de la diferencia de temperatura y es una de las formas en la que la energía se transmite de un medio a otro, mientras que la transferencia de calor trata de determinar las razones de dicha transferencia.

La diferencia de temperatura es la fuerza que impulsa el proceso, y la velocidad de transferencia de calor depende de la magnitud del gradiente. En síntesis, la transferencia de calor es la energía en tránsito debido a una diferencia de temperaturas. Como se ilustra en la Figura 14, el calor puede transferirse de tres modos: conducción, convección y radiación [15], [27].



Figura 14. Los 3 ejemplos de transferencia de calor [14]

IV-Q. Mecanismos de Transferencia de Calor

IV-Q1. *Conducción*: Es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas [14]. La rapidez de la conducción del calor se ve afectada por las características geométricas, el espesor, el material y la diferencia de temperatura a la que está sometida. Otro concepto esencial dentro del estudio de la transferencia de calor es la conductividad térmica que indica la rapidez con la que la energía se transfiere a través del proceso de difusión y depende directamente de la estructura física de la materia. La razón de transferencia de calor se define como la cantidad de energía calorífica transferida por unidad de tiempo [15].

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = k A \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{o} \quad \dot{Q}_{\text{cond}} = \frac{k A \Delta T}{e}$$

Donde:

- \dot{Q}_{cond} Potencia térmica transferida [W]
- k o λ Conductividad térmica del material [W/m·K]
- A Área perpendicular al flujo de calor [m²]
- ΔT Diferencia de temperatura [K o °C]
- e o Δx Espesor del material [m]

IV-Q2. Convección: Un punto crítico en el análisis térmico del prototipo, conforme a las observaciones realizadas, es la pérdida de calor por convección natural en la cara exterior de la carcasa. Este fenómeno rige la temperatura final que percibirá el usuario al manipular el equipo.

Para los cálculos de este proyecto, se ha determinado un coeficiente de transferencia de calor por convección. Por lo tanto la convección natural es el aire circundante se desplaza únicamente por diferencias de densidad debidas a la temperatura, sin ventilación forzada externa y por otro lado el de estado estacionario es el cálculo asume que el horno ha alcanzado su temperatura de consigna y el flujo térmico se ha estabilizado.

Es imperativo considerar que un valor bajo implicaría un aislamiento deficiente en la capa límite, elevando la temperatura superficial, lo cual se dio análisis de seguridad operativo para mantenerla bajo o menor a los $65^{\circ}C$. [27].

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h A \Delta T \quad (2)$$

Donde:

- \dot{Q}_{conv} Potencia térmica transferida [W]
- h Coeficiente de convección [$W/m^2 \cdot K$]
- A Área de la superficie expuesta [m^2]
- ΔT Diferencia entre temperatura superficial y del fluido [K o $^{\circ}C$]

IV-Q3. Radiación: La principal característica de la radiación es que es emitida en forma de ondas electromagnéticas como consecuencia de los cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos y moléculas. A diferencia de la conducción y convección, no requiere un medio material.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A (T_1^4 - T_2^4) \quad (3)$$

Donde:

- \dot{Q}_{rad} Potencia neta radiada [W]
 ε Emisividad de la superficie (0–1) [adimensional]
 A Área emisora [m²]
 σ Constante de Stefan-Boltzmann
 T_1, T_2 Temperaturas absolutas de las superficies [K]

Tabla III
 RESUMEN RÁPIDO DE LAS TRES ECUACIONES

Mecanismo	Ecuación	Factor clave
Conducción	$\dot{Q} = kA\Delta T/e$	Conductividad k
Convección	$\dot{Q} = hA\Delta T$	Coefficiente h
Radiación	$\dot{Q} = \varepsilon\sigma A(T_1^4 - T_2^4)$	Emisividad ε y T^4

IV-R. Aislamiento térmico

Para que un material cumpla con la condición de aislante térmico debe tener una conductividad térmica baja; esto se puede obtener almacenando o llenando de algún tipo de gas (como el aire) dentro de los equipos. El aislamiento térmico consiste en el empleo de materiales de muy baja conductividad térmica, como los listados en la Tabla IV, con el propósito de reducir al mínimo la transferencia de calor por conducción, convección y radiación.

En hornos de laboratorio, permite alcanzar y sostener altas temperaturas internas mientras la superficie externa permanece a niveles seguros (-60 °C). Se consigue combinando baja conductividad, espesor adecuado y, en algunos casos, barreras reflectantes a la radiación. Un diseño eficiente disminuye el consumo eléctrico, mejora la uniformidad térmica y aumenta la vida útil del equipo [11].

Tabla IV
COMPARACIÓN DE COSTOS Y RENDIMIENTO DE AISLANTES TÉRMICOS

Material	Costo relativo	Temp. máx. típica	Conductividad térmica (W/m·K)	Característica
Lana de roca (100–150 kg/m ³)	Bajo (\$)	750–850 °C	0.030–0.040	Aislante bueno
Silicato cálcico / Vermiculita	Bajo-Medio (\$)	900–1100 °C	0.100–0.200	Aislante moderado
Fibra cerámica (manta)	Alto (\$)	1260–1430 °C	0.060–0.120	Aislante muy bueno
Tablero rígido de fibra cerámica	Muy alto (\$)	1400–1600 °C	0.100–0.200	Aislante bueno
Microporoso (Microtherm/Wacker)	Premium (\$)	1000 °C	0.015–0.025	Aislante excelente
Cemento refractario	Bajo-Medio (\$)	1200–1800 °C	0.800–1.500	Aislante no tan bueno

IV-R1. Primera Ley de la Termodinámica: La Primera Ley de la Termodinámica, conocida como el principio de conservación de la energía, establece que la energía no se puede crear ni destruir, solo transformarse. En un sistema cerrado, el cambio en la energía interna es igual al calor neto transferido al sistema menos el trabajo neto realizado por el sistema [14], [15].

$$\Delta U = \Delta Q - \Delta W \quad (4)$$

Donde:

- ΔU es el cambio en la energía interna del sistema (J).
- ΔQ es el calor transferido al sistema (+) o desde el sistema (-) (J).
- ΔW es el trabajo realizado por el sistema (+) o sobre el sistema (-) (J).

Para sistemas cerrados en reposo (sin cambios en energía cinética ni potencial), la energía interna U representa toda la energía contenida en el sistema, incluyendo energía térmica y energía de enlace molecular, como se muestra en la Figura 15. El enunciado fundamental es:

“Cualquier cambio experimentado por la energía de un sistema proviene del trabajo mecánico realizado, más el calor intercambiado con el entorno”

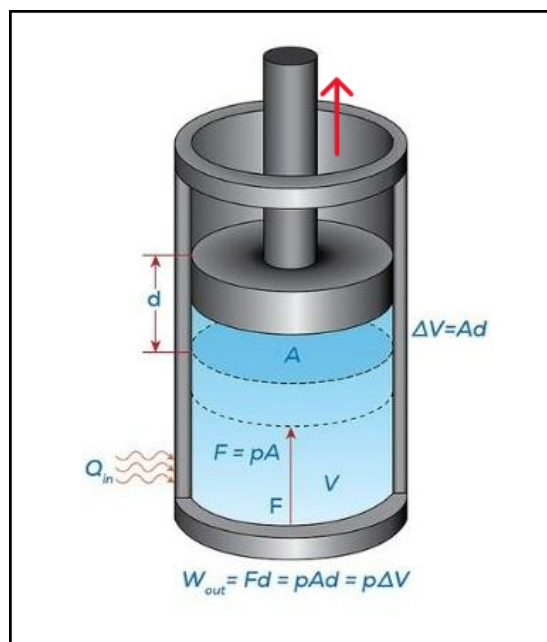


Figura 15. Esquema que muestra la primera ley de la termodinámica

Para procesos específicos, la Primera Ley se simplifica:

- **Proceso isométrico** ($V = \text{constante}$): $W = 0$, por lo tanto $Q = \Delta U = m C_v \Delta T$.
- **Proceso isobárico** ($P = \text{constante}$): $Q = \Delta H = m C_p \Delta T$, donde $H = U + PV$ es la entalpía.
- **Proceso adiabático** ($Q = 0$): $\Delta U = -W$ (el trabajo se realiza a expensas de la energía interna).
- **Proceso isotérmico** ($T = \text{constante}$): Para gases ideales, $\Delta U = 0$, por lo tanto $Q = W$.

IV-R2. *Balance de Energía para Sistemas Cerrados*: El balance de energía para un sistema cerrado sin cambios en energía cinética ni potencial se expresa mediante la Primera Ley de la Termodinámica:

$$\Delta U = Q - W \quad (5)$$

Para procesos a volumen constante (como en hornos industriales cerrados donde el volumen no cambia significativamente), el trabajo $W = 0$ y la ecuación se simplifica a:

$$Q = \Delta U = m C_v \Delta T \quad (6)$$

Esta relación es válida **únicamente si no existe cambio de fase** (calor sensible).

- Si el material permanece en su estado (sólido, líquido o gas), la energía absorbida aumenta su temperatura.
- Si el material alcanza su punto de cambio de estado (ej. ebullición o fusión), la temperatura se mantiene constante a pesar de que se siga suministrando energía; esta energía se consume en el cambio de fase (*calor latente*) y la fórmula anterior deja de ser aplicable.

V. MARCO METODOLÓGICO

V-A. Análisis Térmico

El análisis térmico se fundamenta en la Ley de Fourier para la conducción y la Ley de Enfriamiento de Newton para la convección externa. Dado que el prototipo utiliza una combinación de cemento refractario y fibra cerámica, se analiza el comportamiento del flujo de calor a través de una pared compuesta plana según la geometría del horno.

El sistema de aislamiento se diseña bajo el concepto de resistencia térmica en serie. El cemento refractario, ubicado en la cara interna, proporciona alta resistencia al choque térmico y protección mecánica a la fibra cerámica.

Los parámetros de diseño empleados son:

- Conductividad del cemento refractario (k_{cem}): 1,0 W/(m·K)
- Conductividad de la lana cerámica (k_{lana}): 0,06 W/(m·K)
- Espesor del cemento refractario (x_{cem}): 0,045 m
- Espesor de la lana cerámica (x_{lana}): 0,025 m
- Coeficiente de convección natural (h): 10 W/(m²·K)
- Temperatura interna de diseño: $T_{\text{int}} = 250$ °C
- Temperatura ambiente: $T_{\text{amb}} = 25$ °C

La resistencia térmica total del sistema se lo calculo solamente para hacer una idea aproximada del comportamiento, por lo tanto no se busco ser tan preciso porque hay distorsiones que no se puede afrontar como es la resistencia en las esquinas. Como se calculo total sumando las resistencias en serie:

$$R_{\text{total}} = \frac{x_{\text{cem}}}{k_{\text{cem}}} + \frac{x_{\text{lana}}}{k_{\text{lana}}} + \frac{1}{h} = \frac{0,045}{1,0} + \frac{0,025}{0,06} + \frac{1}{10} = \boxed{0,561 \frac{\text{K}\cdot\text{m}^2}{\text{W}}} \quad (7)$$

Para el cemento refractario (espesor $x_{\text{cem}} = 0,045$ m, aplicado sobre las 4 caras de la cámara interna de $0,150 \times 0,150$ m):

El bloque de cemento presenta dimensiones exteriores de $250 \times 250 \times 150$ mm con un hueco interior de $150 \times 150 \times 150$ mm y una densidad de $\rho_{\text{cem}} = 1400$ kg/m³:

$$V_{\text{ext}} = 0,250 \times 0,250 \times 0,150 = 0,009375 \text{ m}^3 \quad (8)$$

$$V_{\text{hueco}} = 0,150 \times 0,150 \times 0,150 = 0,003375 \text{ m}^3 \quad (9)$$

$$V_{\text{neto}} = V_{\text{ext}} - V_{\text{hueco}} = 0,009375 - 0,003375 = 0,006 \text{ m}^3 \quad (10)$$

$$m_{\text{cem}} = \rho_{\text{cem}} \times V_{\text{neto}} = 1400 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,006 \text{ m}^3 = \mathbf{8,40} \text{ kg} \quad (11)$$

Para una carcasa de dimensiones externas $0,3 \times 0,3 \times 0,185$ m, el área total de transferencia es:

$$A = 2 \cdot (0,3 \cdot 0,3 + 0,3 \cdot 0,185 + 0,3 \cdot 0,185) \approx 0,402 \text{ m}^2 \quad (12)$$

A. Flujo de calor por unidad de área:

$$q = \frac{T_{\text{int}} - T_{\text{amb}}}{R_{\text{total}}} = \frac{250 - 25}{0,561} \approx 401 \text{ W/m}^2 \quad (13)$$

B. Potencia perdida total:

$$Q_{\text{loss}} = q \cdot A = 401 \times 0,402 \approx \mathbf{161,2} \text{ W} \quad (14)$$

C. Temperatura en la cara exterior:

$$T_{\text{sup}} = T_{\text{amb}} + \left(q \cdot \frac{1}{h} \right) = 25 + (401 \times 0,1) \approx \mathbf{65,1} \text{ } ^\circ\text{C} \quad (15)$$

Para la lana cerámica (espesor $x_{\text{lana}} = 0,025$ m, sobre el área media entre cemento y carcasa, $A_{\text{media}} \approx 6 \times (0,240)^2$):

$$V_{\text{ext}} = 0,300 \times 0,300 \times 0,185 = 0,01665 \text{ m}^3 \quad (16)$$

$$V_{\text{hueco}} = 0,275 \times 0,275 \times 0,160 = 0,01210 \text{ m}^3 \quad (17)$$

$$V_{\text{neto}} = V_{\text{ext}} - V_{\text{hueco}} = 0,01665 - 0,01210 = 0,00455 \text{ m}^3 \quad (18)$$

$$m_{\text{lana}} = \rho_{\text{lana}} \times V_{\text{neto}} = 128 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \times 0,00455 \text{ m}^3 \approx 0,582 \text{ kg} \quad (19)$$

La Tabla V resume los resultados del análisis térmico. La temperatura superficial exterior de 65,1 °C se mantiene dentro de los rangos de seguridad para entornos de laboratorio, cumpliendo el objetivo de proteger al operario.

Tabla V
RESUMEN DEL ANÁLISIS TÉRMICO DEL PROTOTIPO.

Parámetro	Símbolo	Valor Calculado
Resistencia Térmica Total	R_{tot}	0,561 K·m ² /W
Flujo de Calor Unitario	q''	401 W/m ²
Pérdida de Potencia Total	Q_{loss}	161,2 W
Temperatura de Carcasa Ext.	T_{sup}	65,1 °C

La fibra cerámica (Fibrafrax[®] o equivalente) actúa como el principal aislante del sistema gracias a su baja conductividad térmica ($k = 0,06 \text{ W/m}\cdot\text{K}$), estabilidad hasta 1200 °C y baja densidad. Su justificación frente a alternativas más densas (ladrillos refractarios) radica en la reducción significativa del peso total de la estructura sin sacrificar eficiencia térmica.

Con tan solo 0,025 m de espesor, la lana cerámica aporta una resistencia térmica de 0,416 K·m²/W, representando el **74 %** de la resistencia total del sistema de aislamiento, mientras que el cemento refractario (0,045 m) contribuye con 0,045 K·m²/W. Esta combinación garantiza una adecuada retención térmica minimizando las pérdidas de energía hacia el ambiente.

V-B. Diseño Mecánico

El diseño mecánico define las características físicas, dimensionales y estructurales del horno. El prototipo fue diseñado íntegramente en SolidWorks 2024 bajo un enfoque modular que facilita el ensamblaje y el mantenimiento. Las dimensiones externas son $300 \text{ mm} \times 300 \text{ mm} \times 185 \text{ mm}$, con una cámara útil interna de $150 \times 150 \times 150 \text{ mm}$.

V-B1. *Selección de Materiales:* La selección se realizó considerando resistencia térmica y mecánica, disponibilidad local y costo. La Tabla VI presenta la comparativa entre las opciones evaluadas para la carcasa exterior.

Tabla VI
COMPARATIVA TÉCNICA DE MATERIALES PARA LA CARCASA EXTERIOR.

Material	k [W/(m·K)]	Costo relativo	Resistencia térmica
Acero AISI 1010	~ 50	Bajo	Adecuada
Acero Inoxidable AISI 304	~ 16	Alto	Excelente
Acero Galvanizado	~ 50	Medio-Alto	Limitada

Los materiales finales seleccionados para cada componente son:

- **Carcasa externa:** Acero al carbono AISI 1010 — bajo costo, facilidad de mecanizado y rigidez suficiente para temperaturas exteriores inferiores a $80 \text{ }^\circ\text{C}$.
- **Aislamiento:** Lana cerámica Fibrafrax® ($k \approx 0,05 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$) y cemento refractario ($k \approx 1,0 \text{ W/(m}\cdot\text{K)}$).
- **Sistema de sellado:** Junta de silicona de alta temperatura, estable hasta $300 \text{ }^\circ\text{C}$.

El Acero AISI 1010 fue elegido para la carcasa exterior por tres razones principales: su rigidez estructural garantiza que no se deforme bajo el peso del aislamiento interno ni ante las cargas térmicas de operación continua (dado que $T_{\text{sup}} < 80 \text{ }^\circ\text{C}$); su bajo costo y alta disponibilidad en el mercado local son significativamente frente al acero inoxidable; y su facilidad de mecanizado permite los procesos de corte, doblado y taladrado con equipamiento convencional de taller.

V-B2. *Cálculos Estructurales:* Para validar el diseño estructural se realizaron simulaciones de esfuerzos mediante el módulo SolidWorks Simulation, empleando el método de elementos finitos (FEM). El análisis estático arrojó una tensión máxima Von Mises de $53,38 \text{ MPa}$, concentrada en los anclajes de las resistencias a $150 \text{ }^\circ\text{C}$ y en lugar

de hacer con tanto esfuerzo estático, se mantuvieron los mismo valores por la cantidad excesiva de esfuerzo. Este valor es significativamente inferior al límite elástico de los materiales seleccionados ($\sigma_e > 200$ MPa), confirmando la seguridad del diseño.

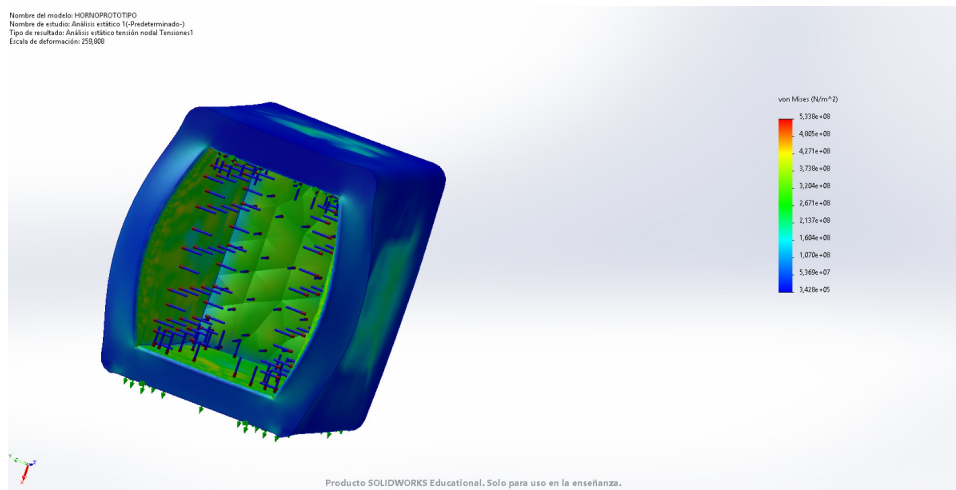


Figura 16. Análisis FEM del horno en SolidWorks Simulation. Por Autores

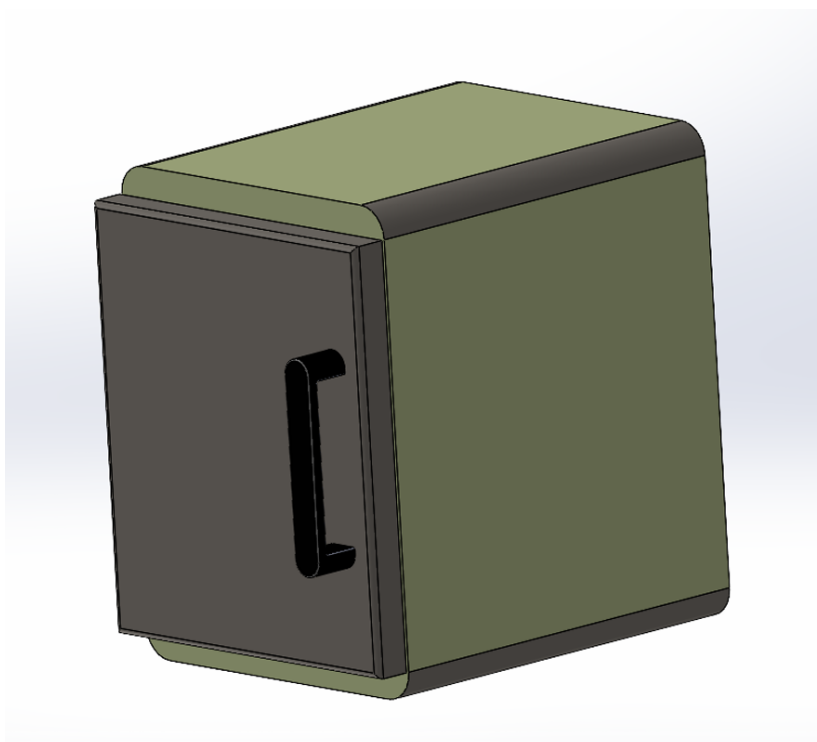


Figura 17. Prototipo de horno modelado en SolidWorks. Por Autores

Procesos de Manufactura: Los procesos empleados para la construcción del prototipo fueron:

- **Corte de lámina:** Cizalla mecánica para la carcasa en acero AISI 1010.
- **Soldadura TIG:** Ensamblaje de la cámara interna en acero inoxidable AISI 304.
- **Taladrado:** Generación de orificios de montaje y paso de cables.
- **Acabado superficial:** Lijado y pintura resistente al calor en la carcasa externa.



Figura 18. Taladrado del horno industrial. Por Autores

V-C. Diseño Eléctrico y Electrónico

El diseño electrónico comprende la selección e integración de los componentes de sensado, actuación, procesamiento y comunicación. Para validar la arquitectura antes del montaje físico, se elaboró el esquema general de conexiones en CADe_SIMU visto en la Figura 19 donde no se considera la alimentación eléctrica del arduino mega, porque va estar conectado a la computadora, para la comunicación de datos de la señal, además los pines 13 y 14 de SSR que se muestran son dentro del relé de estado sólido, que detalla la integración de la etapa de potencia (120 V AC) con la etapa de control (Arduino Mega y Transmisor PR4116).

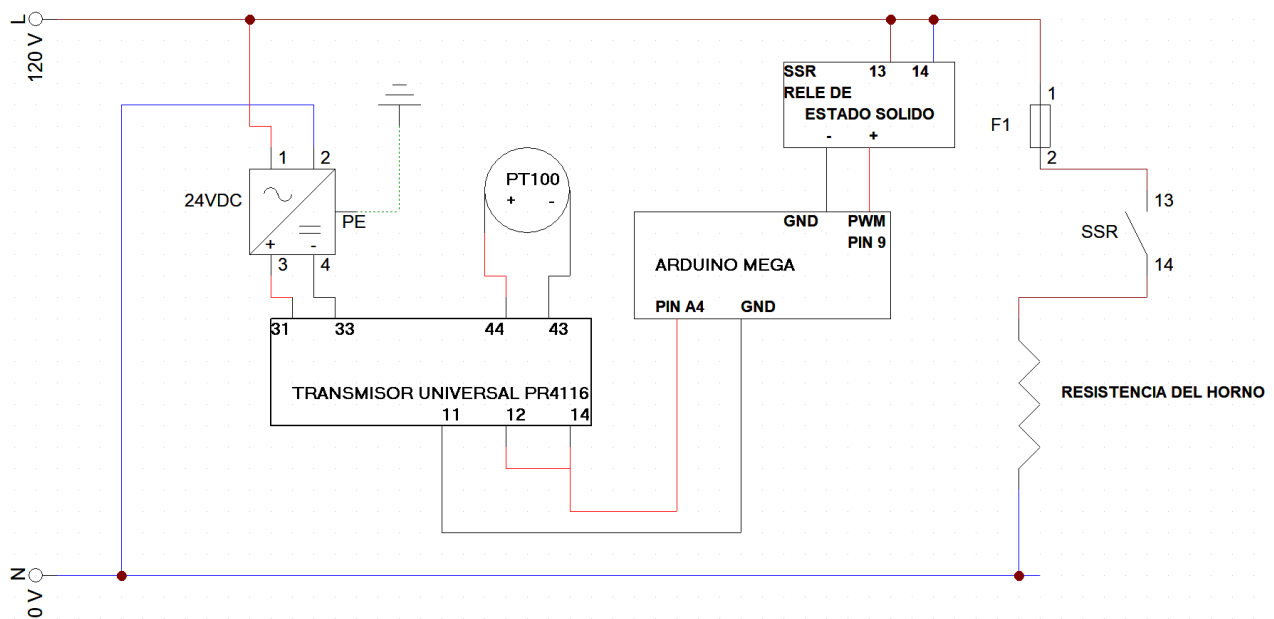


Figura 19. Esquema eléctrico general de control y potencia diseñado en CADe_SIMU. Por Autores

V-C1. *Sensor y transmisor:* Se evaluaron termopares tipo K, RTD PT100 y sensores semiconductores el LM35. Se seleccionó la PT100 por las siguientes ventajas:

- Rango de medición: $-200\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+850\text{ }^{\circ}\text{C}$, mientras el LM35, por su parte, limita su rango a -55 a $+150\text{ }^{\circ}\text{C}$ y carece de robustez industrial.
- Alta precisión: $\pm 0,15\text{ }^{\circ}\text{C}$ en Clase A versus al $\pm 2,2\text{ }^{\circ}\text{C}$ del termopar tipo K).
- Excelente estabilidad a largo plazo y linealidad superior.

El transmisor universal PR 4116 de PR Electronics acondiciona la señal de la PT100 (resistencia variable 100–138,5 Ω para 0 a 200 °C) y la convierte en 0 a 5 V DC compatible con el Arduino. Se seleccionó por:

- **Compatibilidad con RTD:** Linealiza directamente la señal de la PT100.
- **Aislamiento galvánico:** 2,3 kVAC entre entrada, salida y alimentación, protegiendo al microcontrolador del ruido eléctrico de la etapa de potencia.
- **Salida normalizada:** Señal limpia de 0 a 5 V DC, maximizando la resolución del ADC.
- **Diagnóstico:** Detección de rotura de sensor para activar protocolos de seguridad.

La Conexión del PR4116 con Terminales 31–33 para la alimentación 24 V DC, terminales 43–44 para la PT100 a 2 hilos, terminales 11–12 para la salida 0 a 5 V DC para el arduino y terminal 14 a GND.

Luego, la fuente PM 1207 de Siemens que se muestra en la Figura 20, proporciona 24 V DC \pm 0,1 % de regulación, 2,5 A de salida, protección contra sobrecarga y cortocircuito, y arranque suave para evitar picos transitorios. Su selección, junto con la PT100 y el PR4116, se basó en tres criterios: **precio accesible**, **precisión** adecuada para control difuso (error < \pm 1 °C) y **disponibilidad** en el mercado local.

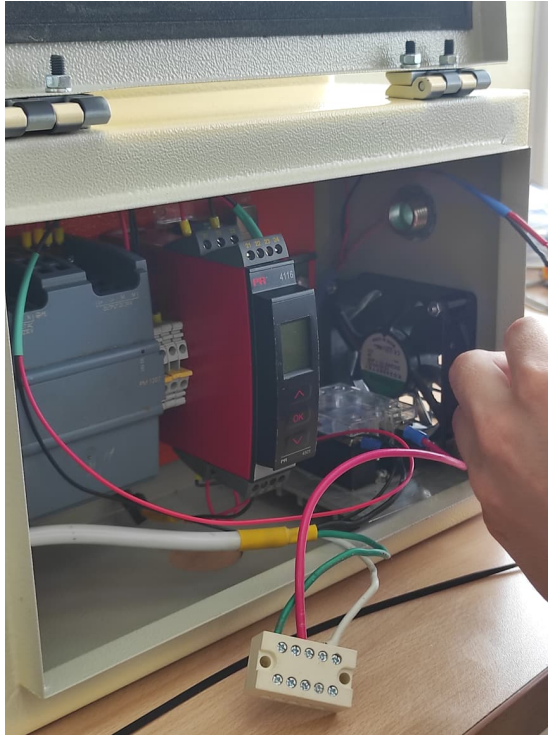


Figura 20. Montaje interno del gabinete: Transmisor PR4116, fuente y ventilación. Por Autores

V-C2. *Actuador térmico*: La resistencia de alambre enrollado tipo espiral en Nicrom (NiCr), visible en la Figura 21, fue seleccionada frente a resistencias de cuarzo (frágiles y costosas) y cerámicas (alta masa térmica dificulta el control fino). Sus ventajas son: coeficiente de temperatura estable, mayor superficie de emisión por su geometría en espiral y compatibilidad directa con el SSR a 120 V AC.

Los cálculos de potencia y longitud se presentaron en la Sección 2.3. El control de potencia se implementa mediante PWM a 1 Hz desde el Arduino, frecuencia apropiada dada la alta inercia térmica del sistema.

Se utilizó alambre de Nicrom (NiCr) para fabricar la resistencia calefactora. Con un voltaje de alimentación de 120 V AC y una potencia objetivo de 580 W:

$$R = \frac{V^2}{P} = \frac{120^2}{580} \approx 24,82 \, \Omega \quad I = \frac{V}{R} = \frac{120}{24,82} \approx 4,8 \, \text{A} \quad (20)$$

Con una resistividad lineal del Nicrom de $3,4 \, \Omega/\text{m}$, la longitud necesaria del conductor es:

$$L = \frac{R}{\lambda_{\text{NiCr}}} = \frac{24,82}{3,4} \approx 7,3 \text{ m} \quad (21)$$

Esta longitud se enrolló en espiral y se distribuyó uniformemente en las paredes laterales de la cámara interna.



Figura 21. Resistencia de Nicrom (NiCr) enrollada en espiral. Por Autores

V-C3. Interfaz de Control - Fuerza:

Relé de Estado Sólido (SSR) — Memoria de Cálculo: Se seleccionó el SSR-60DA (Fotek o equivalente) frente a relés electromecánicos por su vida útil superior a 10.000.000 de ciclos, operación silenciosa, conmutación por cruce por cero y compatibilidad directa con 3–32 V DC del Arduino. Las siguientes ecuaciones validan la protección del circuito:

$$I_{\text{carga}} = \frac{P}{V} = \frac{580 \text{ W}}{120 \text{ V}} \approx 4,83 \text{ A} \quad P_{\text{diss}} = I_{\text{carga}} \times V_{\text{drop}} = 4,83 \times 1,5 \approx 7,25 \text{ W} \quad (22)$$

El SSR-60DA opera al 8% de su capacidad máxima (60 A), garantizando larga vida útil. El disipador de calor debe tener resistencia térmica inferior a 2,0 °C/W. Se instaló un fusible de acción rápida de 15 A en serie (150% de I_{carga}) para protección contra cortocircuitos, respetando una distancia mínima de 8 mm entre terminales según IEC 60664-1.

V-D. Sistema de Control

Placa de Desarrollo — Arduino Mega 2560: Para el procesamiento del algoritmo difuso se seleccionó el Arduino Mega 2560 sobre el Uno o Nano por:

- **Memoria:** 256 kB de Flash permiten implementar el FIS con 25 reglas (el Uno con 32 kB resulta insuficiente).
- **Pines:** 54 digitales (15 PWM) y 16 analógicos facilitan la expansión futura.
- **UART múltiple:** 4 puertos seriales para comunicación simultánea con PC y periféricos.
- **Costo:** \$25–\$40 USD con amplia disponibilidad local.

La resolución de lectura del ADC de 10 bits proporciona:

$$\text{Resolución} = \frac{150 \text{ °C}}{1024} \approx 0,146 \text{ °C/bit} \quad T_{\text{°C}} = \frac{V_{\text{ADC}} \times 150}{1023} \quad (23)$$

Dado que el PR4116 entrega 0–10 V DC y el pin A4 acepta hasta 5 V DC, se implementó un divisor resistivo de precisión 2 : 1 (dos resistencias de 10 k Ω al 1 %) para adaptar el rango y proteger el microcontrolador.

El algoritmo ejecutado cada 200 ms sigue la secuencia:

1. Leer temperatura actual desde el PR4116 (pin A4).
2. Calcular $e = T_{\text{setpoint}} - T_{\text{actual}}$.
3. Calcular Δe mediante diferencia finita.
4. Evaluar el FIS: Variables \rightarrow Fusificación \rightarrow Inferencia \rightarrow Defuzzificación.
5. Convertir ControlSSR (0–100 %) a valor PWM (0–255).
6. Actualizar salida en Pin 9 (señal al SSR).
7. Transmitir datos a MATLAB vía Serial (9600 baud).

Se seleccionó la frecuencia de muestreo de 5 Hz ya que es suficiente para sistemas térmicos con constantes de tiempo superiores a 30 s, cumpliendo el criterio de muestreo de Nyquist para sistemas de control digital.

V-D1. Desarrollo del Algoritmo: MATLAB se seleccionó como plataforma de desarrollo del controlador difuso por las siguientes razones:

1. **Fuzzy Logic Toolbox:** Incluye el *Fuzzy Logic Designer* para crear sistemas de inferencia difusa (FIS), definir funciones de pertenencia y especificar reglas si-entonces de forma gráfica.
2. **Integración con Simulink:** Permite modelar la planta térmica e integrar el controlador mediante el bloque `Fuzzy Logic Controller`, facilitando simulaciones en lazo cerrado y comparación PID vs. Fuzzy.
3. **Sintonización automática:** Herramientas de optimización para ajustar el FIS minimizando IAE, ITAE o ISE; soporta ANFIS para ajuste a partir de datos experimentales.
4. **Generación de código:** Exportación a C/C++ mediante MATLAB Coder para implementación en Arduino o PLCs.
5. **Ecosistema académico:** Entorno estándar en ingeniería de control con amplia documentación y soporte

comunitario.

Controlador PD Difuso: Se seleccionó un controlador Proporcional-Derivativo (PD) difuso en lugar de un PID completo. La ausencia de la acción integral se justifica porque el error en estado estacionario es naturalmente pequeño, la integración introduce lentitud y sobrepaso en sistemas con alta inercia térmica, y la simplicidad del PD facilita la comprensión en entornos educativos. El controlador procesa dos variables de entrada: Error y DeltaError y una salida SSR o también llamado ControlSSR.

La figura 22 muestra las funciones de membresía definidas para la variable de entrada “Error”, que representa la diferencia entre el setpoint deseado y la temperatura actual del horno ($\text{Error} = \text{Setpoint} - \text{Temperatura}$). Esta variable tiene un rango de $[-50, 50]$ grados Celsius y se divide en siete conjuntos difusos:

- **NegGrande:** Error muy negativo (temperatura muy por debajo del setpoint), con función trapezoidal en el rango $[-50, -50, -20, -10]$. Indica que el horno está frío y requiere calentamiento agresivo con máxima potencia.
- **NegMedio:** Error negativo moderado a grande, en el rango $[-15, -10, -5]$. Zona donde el sistema necesita calentar fuertemente pero con menor urgencia que NegGrande. El horno se está aproximando pero aún está considerablemente por debajo del setpoint.
- **NegPeq:** Error negativo pequeño, definido en el rango $[-8, -5, -2]$. Zona crítica de anticipación donde el controlador debe comenzar a moderar el calentamiento para evitar sobrepaso por inercia térmica.
- **Cero:** Error cercano a cero (temperatura próxima al setpoint), definido en el rango $[-3, 0, 3]$. Representa el estado ideal donde se debe mantener estabilidad térmica con mínima o nula intervención del sistema de calentamiento.
- **PosPeq:** Error positivo pequeño, en el rango $[2, 5, 8]$. Indica sobrepaso leve de temperatura, situación no deseada pero tolerable que requiere apagado del calentamiento y espera de enfriamiento natural.
- **PosMedio:** Error positivo moderado, definido en el rango $[5, 10, 15]$. Sobrepaso significativo que indica que el sistema se calentó más de lo deseado, requiriendo apagado total y posiblemente ventilación si está disponible.
- **PosGrande:** Error muy positivo (temperatura muy por encima del setpoint), con función trapezoidal en $[10,$

20, 50, 50]. Sobrecalentamiento severo que requiere apagado total inmediato del sistema de calentamiento y medidas correctivas de emergencia.

La distribución asimétrica de estos conjuntos difusos permite al controlador ser más sensible a los errores negativos que a los positivos, implementando una estrategia conservadora que previene el sobrecalentamiento.

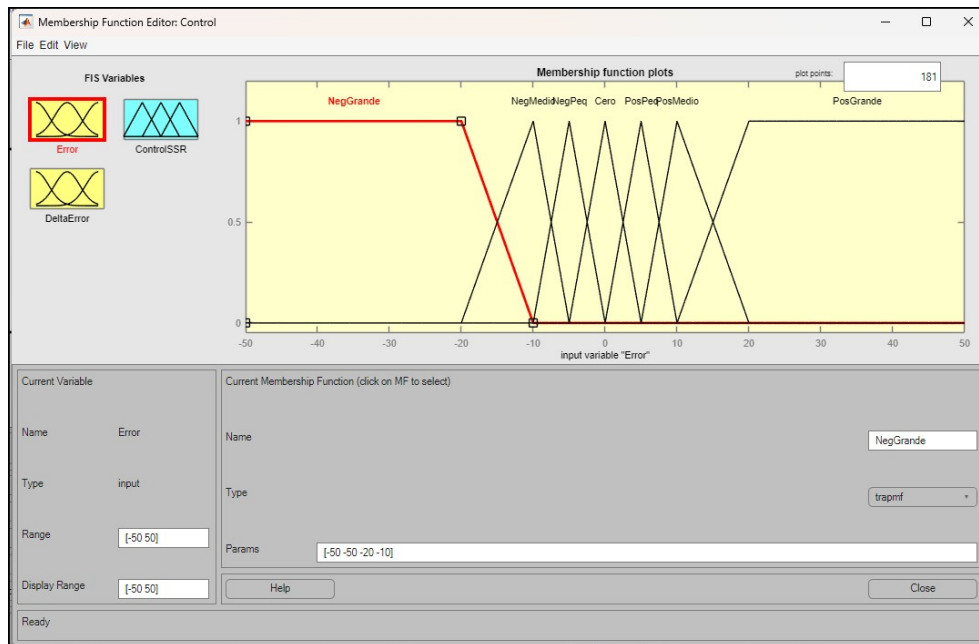


Figura 22. Funciones de membresía de la variable de entrada (Error). Por Autores

Para el DeltaError se definieron tres conjuntos (Negativo, Cero, Positivo) con funciones trapezoidales en el rango $[-10, 10]$ °C/s. La salida *ControlSSR* emplea cinco conjuntos (Apagado, Bajo, Moderado, Alto, Encendido) en el rango $[0, 100]$ %.

La figura 23 presenta las funciones de membresía de la variable “DeltaError”, que representa la derivada o tasa de cambio del error de temperatura. Esta variable es fundamental para el control, ya que permite al sistema detectar tendencias de calentamiento o enfriamiento antes de que se reflejen significativamente en el error absoluto. El rango de DeltaError es $[-10, 10]$ grados Celsius por segundo y se compone de tres conjuntos difusos principales:

- **Negativo:** DeltaError negativo, con función trapezoidal en $[-10, -10, -3, -1]$. Indica que la temperatura está disminuyendo rápidamente, lo cual puede requerir acción correctiva inmediata para evitar alejarse del setpoint.
- **Cero:** DeltaError cercano a cero, definido en el rango $[-2, 0, 2]$. Representa una temperatura estable o con cambios muy lentos, situación ideal cuando se está cerca del setpoint.
- **Positivo:** DeltaError positivo, con función trapezoidal en $[1, 3, 10, 10]$. Señala que la temperatura está incrementándose, información crítica para que permita apagar el calentamiento antes de alcanzar el setpoint y así evitar sobrepaso.

La inclusión de esta variable derivativa es la característica principal que diferencia este controlador de un sistema difuso tradicional basado únicamente en el error. La capacidad de anticipar cambios térmicos permite compensar la considerable inercia térmica del horno industrial.

La variable de salida “ControlSSR” determina el nivel de potencia aplicado al sistema de calentamiento del horno mediante el Relé de Estado Sólido (SSR). Como se observa en la figura 24, esta variable tiene un rango de $[0, 100]$ y se divide en cinco conjuntos difusos:

- **Apagado:** Salida mínima o nula, con función trapezoidal en $[0, 0, 10, 25]$. Corresponde al SSR desactivado completamente, sin entrega de potencia a las resistencias calefactoras.

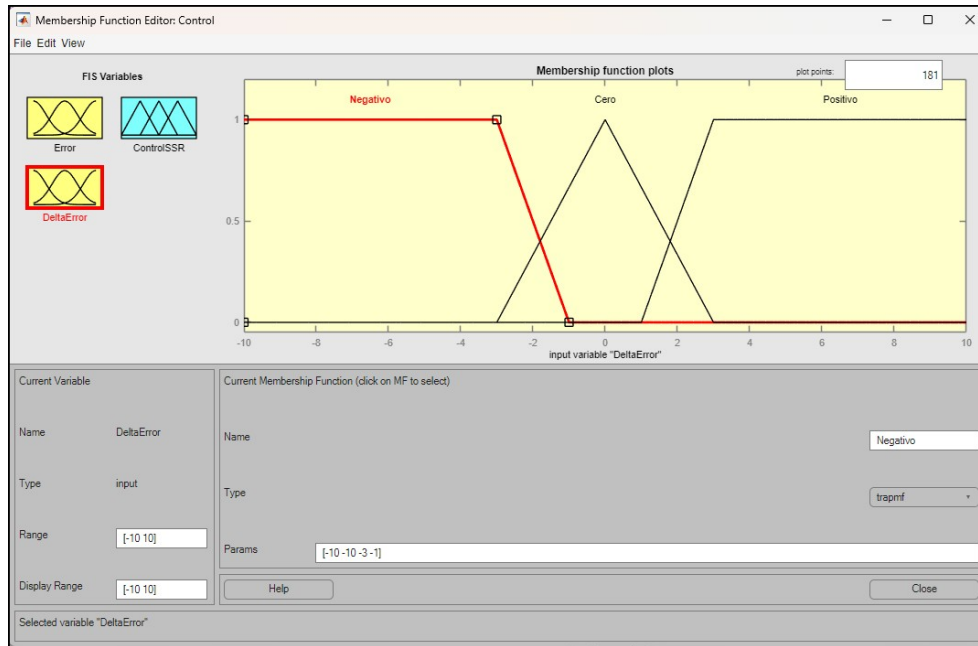


Figura 23. Funciones de membresía de la variable de entrada (DeltaError). Por Autores

- **Bajo:** Potencia reducida, en el rango [15, 30, 45]. Proporciona calentamiento mínimo para ajustes finos cuando la temperatura está muy cerca del setpoint.
- **Moderado:** Potencia media, definida en [35, 50, 65]. Nivel de control intermedio utilizado durante transiciones o cuando se requiere calentamiento moderado.
- **Alto:** Potencia considerable, en el rango [55, 70, 85]. Aplicado cuando la temperatura está significativamente por debajo del setpoint pero acercándose gradualmente.
- **Encendido:** Máxima potencia, con función trapezoidal en [75, 90, 100, 100]. SSR activado al máximo para calentamiento agresivo cuando el error es grande y negativo.

Esta granularidad en los niveles de salida permite un control más suave y gradual del proceso térmico, evitando los cambios bruscos de potencia característicos de un control ON/OFF simple, lo que resulta en menor desgaste del SSR y mejor estabilidad térmica.

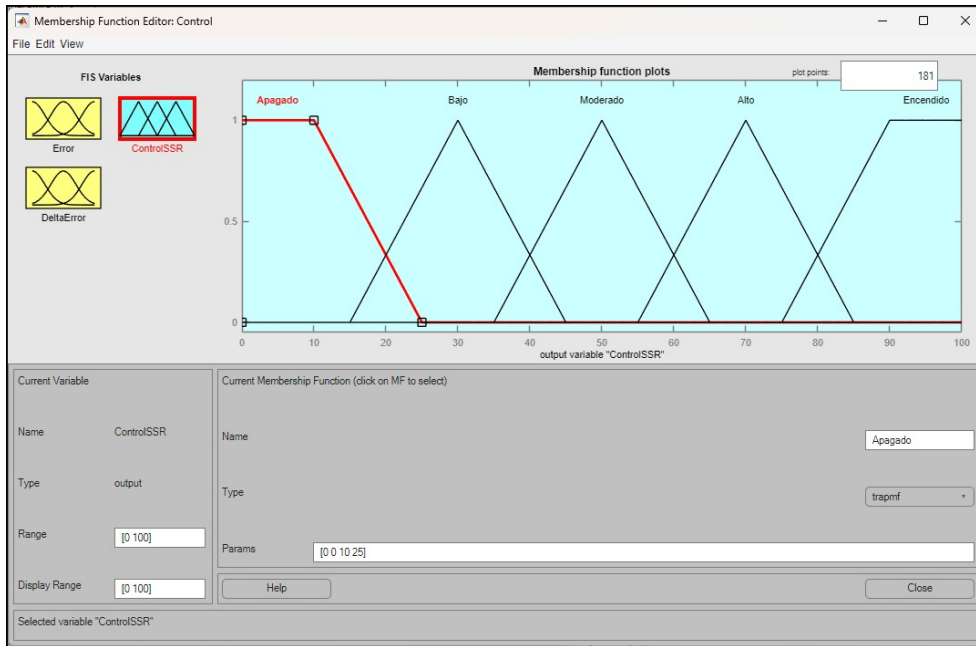


Figura 24. Funciones de membresía de la variable de salida (ControlSSR). Por Autores

Reglas de Inferencia: Se implementaron 25 reglas tipo Mamdani de la forma:

SI Error es X **Y** DeltaError es Y **ENTONCES** ControlSSR es Z

La Tabla VII presenta la matriz de inferencia completa (FAM):

Tabla VII
MATRIZ DE INFERENCIA DIFUSA (REGLAS DE CONTROL).

Error (e)	Delta Error (Δe)		
	Negativo	Cero	Positivo
NegGrande (NG)	Encendido	Encendido	Alto
NegMedio (NM)	Encendido	Alto	Moderado
NegPeq (NP)	Alto	Moderado	Bajo
Cero (Z)	Moderado	Apagado	Apagado
PosPeq (PP)	Bajo	Apagado	Apagado
PosMedio (PM)	Apagado	Apagado	Apagado
PosGrande (PG)	Apagado	Apagado	Apagado

Las reglas de la zona *NegPeq* con DeltaError Cero o Positivo implementan el núcleo preventivo: cuando la temperatura se aproxima al setpoint y se detecta que sube o está estable, se apaga el calentamiento para evitar

sobrepaso por inercia térmica.

El método de implicación empleado es el mínimo de Mamdani (truncamiento), y la agregación entre reglas activas se realiza mediante el operador máximo.

Se asume que para el proceso de defuzzificación, se empleó el método del centroide (*center of gravity*):

$$\text{ControlSSR} = \frac{\int \mu_{\text{agregada}}(x) \cdot x \, dx}{\int \mu_{\text{agregada}}(x) \, dx} \quad (24)$$

Este método proporciona transiciones suaves entre acciones de control, evitando cambios bruscos que podrían desestabilizar el sistema. El valor resultante (0–100 %) se convierte a señal PWM de 8 bits (0–255) mediante transformación lineal en el Arduino.

V-D2. Interfaz: La interfaz gráfica de usuario fue desarrollada en MATLAB App Designer, integrando funcionalidades de ingreso de parámetros, visualización en tiempo real y edición de reglas difusas.

Ingreso de Datos:

- **Puerto COM:** Selector con detección automática de puertos serie disponibles.
- **Setpoint:** Control numérico con rango 10–150 °C, validación de límites y confirmación de seguridad.
- **Editor de reglas:** Tabla de 25 valores modificables en tiempo real (1=Apagado, 2=Moderado, 3=Encendido) sin necesidad de recompilar el código del Arduino.

Presentación de Información:

- **Temperatura actual:** Panel con código de color dinámico (azul/verde/naranja/rojo).
- **Error de control:** Diferencia Setpoint – Temperatura para evaluar la proximidad al objetivo.

- **Estado del SSR:** Indicador LED virtual (gris = apagado, rojo = encendido).
- **Gráfica en tiempo real:** Curva azul (temperatura actual), línea roja punteada (setpoint), línea magenta punteada (zona de apagado = Setpoint - 7,5 °C), actualizada cada 200 ms.

El sistema implementa comunicación serial bidireccional a 9600 baud:

- **MATLAB → Arduino:** Envío del setpoint al modificarlo, permitiendo ajustes dinámicos sin detener el control.
- **Arduino → MATLAB:** Paquetes con temperatura actual, estado del SSR y códigos de alarma, parseados con `textscan()` para actualizar la interfaz.

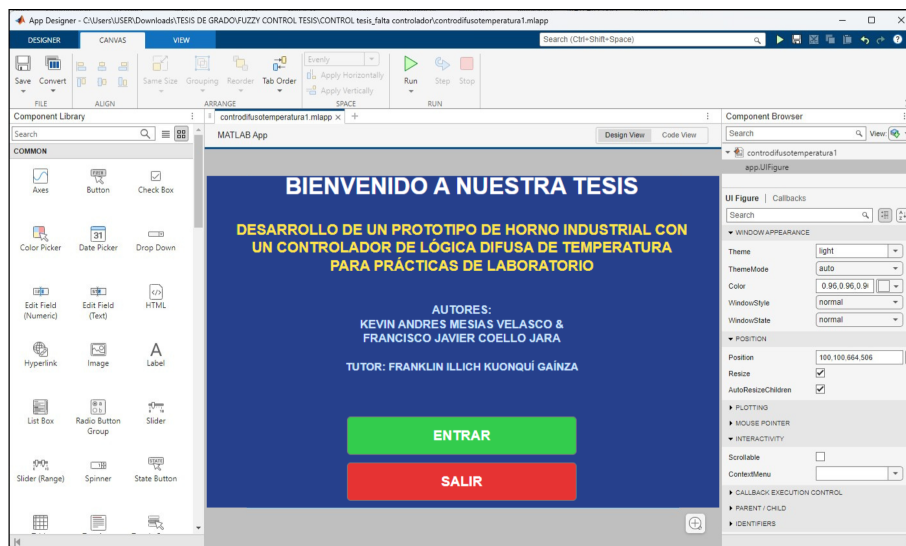


Figura 25. Editor para la interfaz. Por Autores

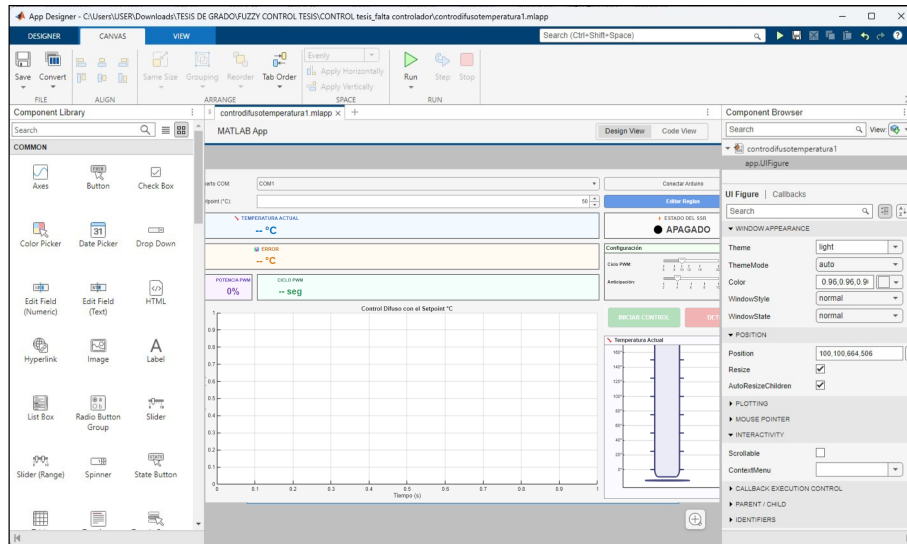


Figura 26. Editor para la interfaz. Por Autores

V-E. Guía de Práctica

Se elaboró una guía de práctica que se ubica en la parte de los anexos en las Figuras 46, 47 y 48, de laboratorio destinada a estudiantes de la carrera, permitiendo operar el horno de forma autónoma y segura. La guía contiene:

- **Objetivo:** Comprender el funcionamiento de un sistema de control de temperatura con lógica difusa en un entorno industrial.
- **Fundamento teórico:** Resumen de transferencia de calor, control difuso (FIS Mamdani) y comunicación Arduino–MATLAB.
- **Equipos y materiales:** Descripción del prototipo, componentes del gabinete y software requerido.
- **Procedimiento:** Encendido, configuración del setpoint desde la HMI, monitoreo de la curva de temperatura y análisis del comportamiento del controlador.
- **Actividades de evaluación:** Preguntas sobre respuesta transitoria, error en estado estacionario y ajuste de reglas difusas.
- **Normas de seguridad:** Precauciones para manejo del equipo a temperaturas elevadas y en presencia de 120 V AC.

V-E1. *Pruebas de Funcionamiento:* Se realizaron pruebas de campo con estudiantes universitarios para validar la usabilidad, seguridad y desempeño del prototipo. Los resultados principales son:

- El controlador difuso apaga las resistencias preventivamente cuando detecta que la temperatura se aproxima al setpoint con derivada positiva, evitando sobrepaso por inercia térmica.
- Para errores superiores a ± 5 °C el sistema actúa con potencia máxima; entre $\pm 1-5$ °C realiza ajustes finos; por debajo de ± 1 °C mantiene la potencia actual para estabilidad.
- En caso de que el transmisor active la señal de fallo del sensor, el algoritmo activa alarmas, apaga las resistencias y solicita mantenimiento, priorizando la seguridad.

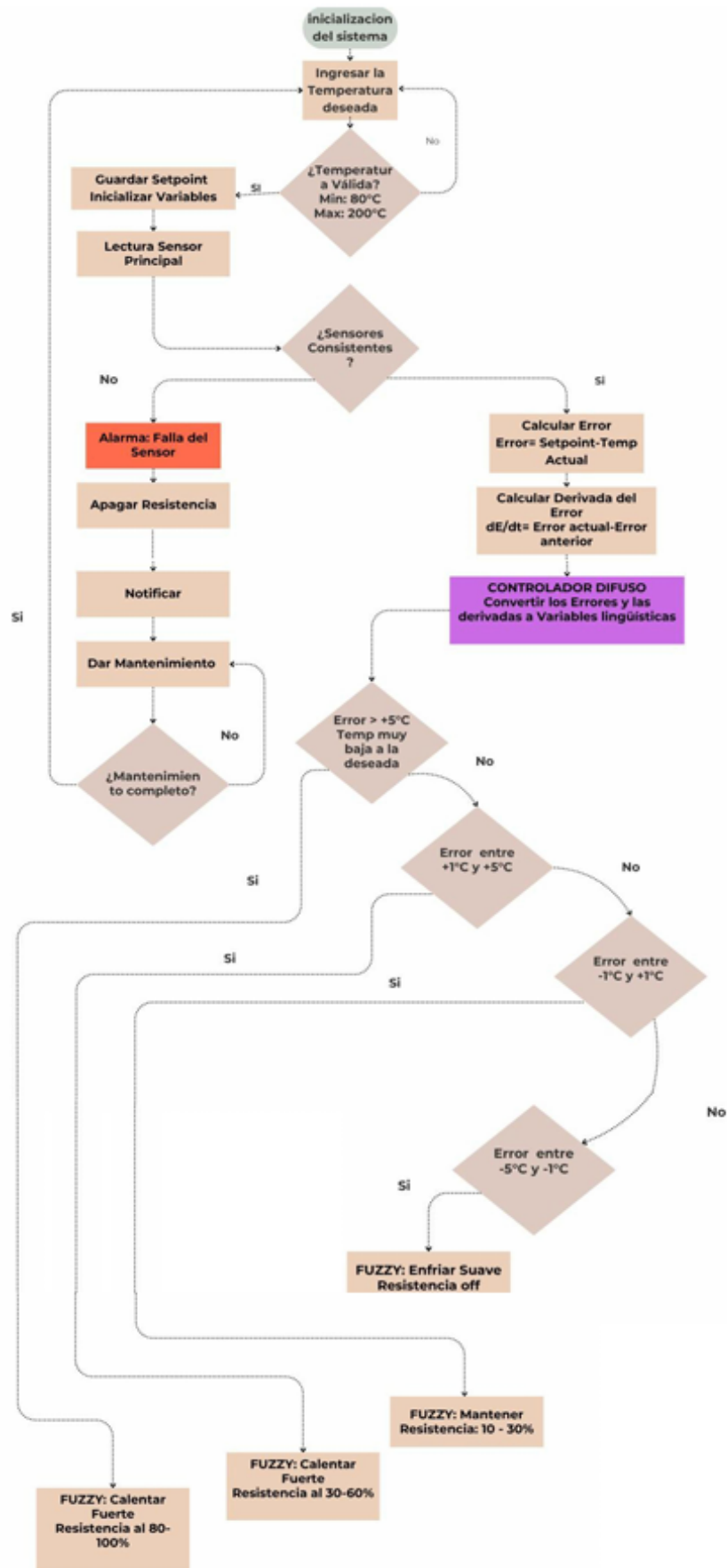


Figura 27. Diagrama de Flujo del algoritmo de control difuso. Por Autores

VI. RESULTADOS

En esta sección se presentan los resultados obtenidos durante el desarrollo y validación del sistema de control difuso para el prototipo de horno industrial. Se incluyen las simulaciones realizadas en MATLAB y Simulink, la configuración del controlador de lógica difusa, y el desempeño del sistema implementado en la interfaz gráfica desarrollada.

VI-A. Configuración del Sistema de Control Difuso en MATLAB

El sistema de control difuso fue desarrollado utilizando el Fuzzy Logic Toolbox de MATLAB. La configuración se realizó mediante un script automatizado que define las variables de entrada, salida y las reglas de inferencia optimizadas para el control de temperatura.

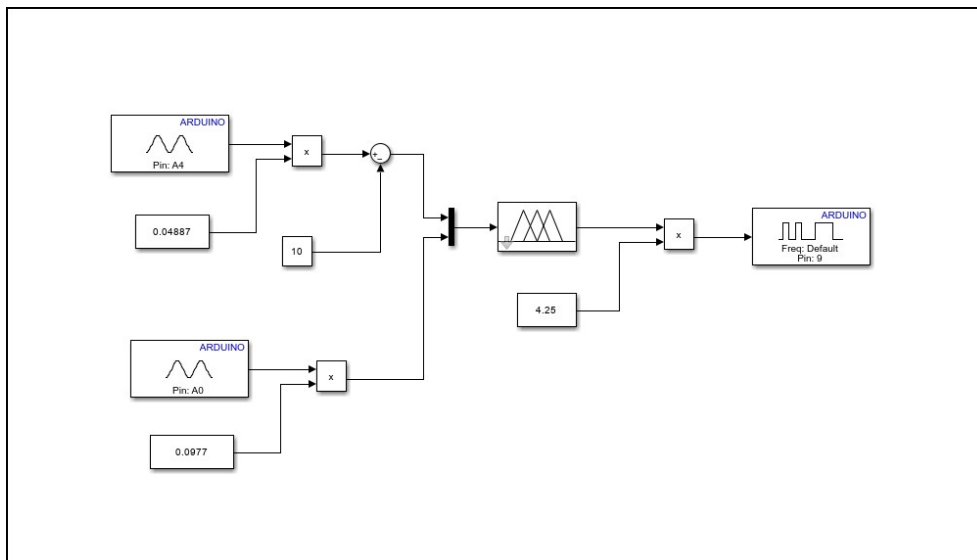


Figura 28. Diagrama de bloques del sistema de control difuso implementado en Simulación. Por Autores

VI-A1. *Implementación del modelo en Simulink:* En la figura 28 se muestra el modelo completo del sistema de control difuso implementado en Simulink. El diagrama consta de los siguientes componentes principales:

- **Entradas analógicas:** Dos bloques de entrada Arduino que adquieren las señales del sensor de temperatura (Pin A0) y del potenciómetro de setpoint (Pin A4). Estas señales son escaladas mediante constantes de conversión (0.04887 para temperatura y 0.0977 para setpoint) que transforman los valores digitales del ADC a unidades

de temperatura en grados Celsius.

- **Cálculo del error:** Un bloque sumador calcula la diferencia entre el setpoint deseado y la temperatura actual medida, generando la señal de error que constituye la primera entrada del controlador difuso.
- **Derivada del error:** Un bloque de derivada discreta calcula la tasa de cambio del error (DeltaError), ampliada por una ganancia de factor 10, que permite al controlador anticipar las tendencias de calentamiento o enfriamiento del horno.
- **Controlador difuso:** El bloque central del sistema que implementa el motor de inferencia con 25 reglas difusas optimizadas. Procesa las dos entradas (Error y DeltaError) mediante funciones de membresía trapezoidales y triangulares para generar una señal de control entre 0 y 100 %.
- **Acondicionamiento de salida:** La salida del controlador difuso es escalada por un factor de 4.25 y saturada entre 0 y 255 para generar una señal PWM compatible con el Arduino que controla el SSR (Solid State Relay) del sistema de calentamiento.
- **Salida PWM:** El bloque de salida Arduino (Pin 9) genera la señal modulada por ancho de pulso que activa o desactiva el SSR, controlando así la potencia entregada a las resistencias calefactoras del horno.

Este diseño modular permite una fácil configuración, prueba y ajuste de los parámetros del controlador, así como la visualización en tiempo real de todas las señales involucradas en el proceso de control.

VI-B. Interfaz Gráfica de Usuario



Figura 29. Pantalla de bienvenida del sistema de control difuso. Por Autores

VI-B1. Pantalla de bienvenida: La figura 29 muestra la interfaz inicial del sistema, desarrollada en MATLAB App Designer. Esta pantalla presenta información institucional del proyecto de tesis, incluyendo:

- Título del proyecto: “Desarrollo de un prototipo de horno industrial con un controlador de lógica difusa de temperatura para prácticas de laboratorio”.
- Información de los autores: Kevin Andrés Mesías Velasco y Francisco Javier Coello Jara.
- Nombre del tutor: Franklin Illich Kuonquí Gaínza.
- Dos botones de acción: “ENTRAR”(color verde) para acceder al panel de control, y “SALIR”(color rojo) para cerrar la aplicación.

Esta interfaz proporciona una presentación profesional del sistema antes de acceder a los controles operacionales, facilitando la identificación del proyecto en entornos académicos y de laboratorio.

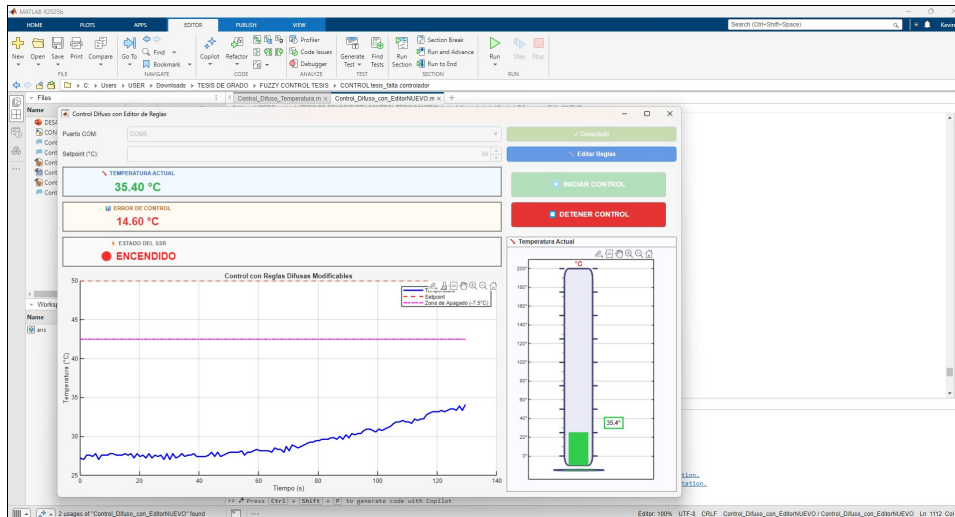


Figura 30. Panel principal de control del sistema con termómetro visual, editor de reglas difusas y gráfica en tiempo real. Por Autores

VI-B2. *Panel principal de control:* La figura 30 presenta el panel de control principal del sistema, que integra todos los elementos necesarios para la operación y monitoreo del horno industrial. La interfaz está organizada en las siguientes secciones:

1. Panel de configuración y conexión:

- **Puerto COM:** Selector desplegable para elegir el puerto de comunicación serial con el Arduino. Muestra automáticamente los puertos disponibles en el sistema.
- **Botón “Conectar Arduino”:** Establece la comunicación serial a 9600 baudios con el microcontrolador. Al conectarse exitosamente, cambia a color verde y muestra “ Conectado”.
- **Setpoint (°C):** Control numérico (spinner) con rango configurable de 10°C a 200°C, permitiendo al usuario establecer la temperatura objetivo deseada. En la imagen se observa un setpoint de 68°C.

2. Indicadores de estado en tiempo real:

- **Temperatura Actual:** Panel destacado con fondo azul claro que muestra la lectura actual del sensor termopar tipo K. Presenta el valor en formato grande (71.66°C en la figura) con código de color que varía según la temperatura: azul para frío (+30°C), verde para templado (30-60°C), naranja para caliente (60-90°C) y rojo para muy caliente (-90°C).

- **Error de Control:** Panel con fondo naranja claro que exhibe la diferencia entre el setpoint y la temperatura actual. Valor negativo (-1.66°C) indica que la temperatura está por debajo del objetivo. El color del texto cambia dinámicamente: verde cuando $|\text{error}| < 1^{\circ}\text{C}$, naranja cuando $|\text{error}| < 3^{\circ}\text{C}$, y rojo cuando el error es mayor.
- **Estado del SSR:** Panel con indicador LED visual que muestra el estado de activación del Relé de Estado Sólido. Presenta APAGADO en gris cuando está desactivado, o ENCENDIDO en rojo cuando las resistencias están activas. Este indicador es crucial para verificar el comportamiento del controlador.

3. Operación botones de control:

- **“INICIAR CONTROL”:** Botón verde que activa el timer de control periódico (cada 0.2s), iniciando el ciclo de lectura de temperatura, evaluación del controlador difuso, y envío de comandos al SSR. Se deshabilita durante la operación.
- **“DETENER CONTROL”:** Botón rojo que detiene el control automático, apaga el SSR por seguridad, y permite modificar el setpoint o desconectar el sistema.

4. Termómetro visual:

Elemento gráfico innovador que proporciona una representación visual intuitiva de la temperatura actual mediante:

- Columna graduada de 0°C a 200°C con marcas principales cada 25°C .
- Indicador numérico visual que sigue la altura del temperatura.
- Sistema de colores: azul (frío), verde (templado), naranja (caliente), rojo (muy caliente).

En la figura 30 se observa el termómetro mostrando 35.4°C con color naranja, indicando una temperatura elevada cercana al setpoint de 68°C .

5. Gráfica de control en tiempo real: Presenta 1 curva y 2 indicadores simultánea que permiten analizar el desempeño del controlador:

- **Línea azul continua:** Curva de temperatura actual medida, actualizada cada 200 ms
- **Línea roja punteada:** Indicador de setpoint objetivo configurado por el usuario.
- **Línea magenta punteada:** Indicador de zona de apagado, que marca el umbral donde el controlador debe desactivar el calentamiento para evitar sobrepaso.

La gráfica incluye leyenda identificativa, ejes etiquetados (Tiempo en segundos vs Temperatura en °C), y título descriptivo “Control con Apagado 7.5°C Antes del Setpoint”. Este elemento es fundamental para el análisis experimental del comportamiento térmico del horno.

6. Botón de edición de reglas difusas:

Ubicado en la segunda fila de la interfaz, junto al control de setpoint, se encuentra el botón “Editar Reglas” con color de fondo azul distintivo ([0.4 0.6 0.9]) que lo diferencia visualmente de los botones operacionales. Este componente proporciona acceso directo a la funcionalidad de modificación de reglas del controlador difuso sin necesidad de detener el proceso de control o acceder a código de programación.

El botón permanece activo en todo momento, permitiendo al usuario:

- Abrir el editor antes de conectar el Arduino para revisar la configuración de reglas actual.
- Acceder durante la operación del sistema para realizar ajustes en tiempo real.
- Modificar reglas y observar inmediatamente el efecto en el comportamiento del controlador.

Al presionar el botón, se ejecuta el método `abrirEditorReglas()` que verifica si la ventana del editor ya existe. En caso afirmativo, la trae al frente; en caso contrario, crea una nueva ventana de 1200×800 píxeles con los siguientes componentes:

- **Tabla interactiva de 25 reglas:** Presenta cinco columnas donde solo la última (“Valor 1-3”) es editable. Las columnas muestran: número de regla, condición de error, condición de derivada del error, nombre de salida actual, y valor numérico editable.
- **Leyenda visual codificada por colores:** Explica el significado de cada valor numérico: 1 = Apagado (0-25 %),

2 = Moderado (25-75 %), 3 = Encendido (75-100 %).

- **Sugerencias de uso:** Proporciona tres recomendaciones prácticas para modificaciones comunes: calentamiento más rápido, control más suave, y prevención de sobrecalentamiento.
- **Advertencias de seguridad:** Informa que los cambios se aplicarán inmediatamente y afectarán el comportamiento en tiempo real si el control está activo.
- **Botones de acción:** Incluye “Aplicar Cambios”(verde) para validar y reconstruir el sistema difuso, “Restaurar Original”(naranja) para volver a la configuración optimizada, y “Cerrar”(gris) para salir del editor.

Antes de aplicar modificaciones, el sistema verifica que cada valor ingresado sea numérico y esté en el rango válido de 1 a 3. Si algún valor no cumple estos criterios, se muestra un mensaje de error especificando el número de regla con problema, y los cambios no se aplican. Esta validación previene configuraciones inválidas que podrían causar mal funcionamiento del controlador.

Reconstrucción del sistema difuso:

Al presionar “Aplicar Cambios”, el sistema ejecuta los siguientes pasos en menos de 100 milisegundos:

1. Valida todos los valores modificados en la tabla.
2. Actualiza la matriz `reglasActuales` con los nuevos valores.
3. Reconstruye el objeto FIS manteniendo las funciones de membresía inalteradas.
4. Agrega las reglas modificadas mediante `addRule(fis, reglasActuales)`.
5. Actualiza la columna (Salida Actual) con los nombres correspondientes.
6. Muestra mensaje de confirmación al usuario.

Esta funcionalidad transforma el sistema de un controlador de parámetros fijos a una herramienta flexible que permite ajuste fino durante la operación, reduciendo el tiempo de modificación de 10-30 minutos (editar código, compilar, cargar) a 30-60 segundos (editar tabla, aplicar). La capacidad de modificación en tiempo real es particularmente valiosa tanto en aplicaciones industriales (permitiendo adaptar el controlador a diferentes procesos) como en entornos educativos (facilitando la experimentación y comprensión de la relación entre reglas difusas y

comportamiento del sistema).

Esta interfaz gráfica completa permite a los usuarios operar el sistema de manera intuitiva, monitoreando simultáneamente múltiples variables del proceso de control, lo que facilita su uso en entornos educativos y de investigación.

VI-C. Respuesta del Sistema Implementado

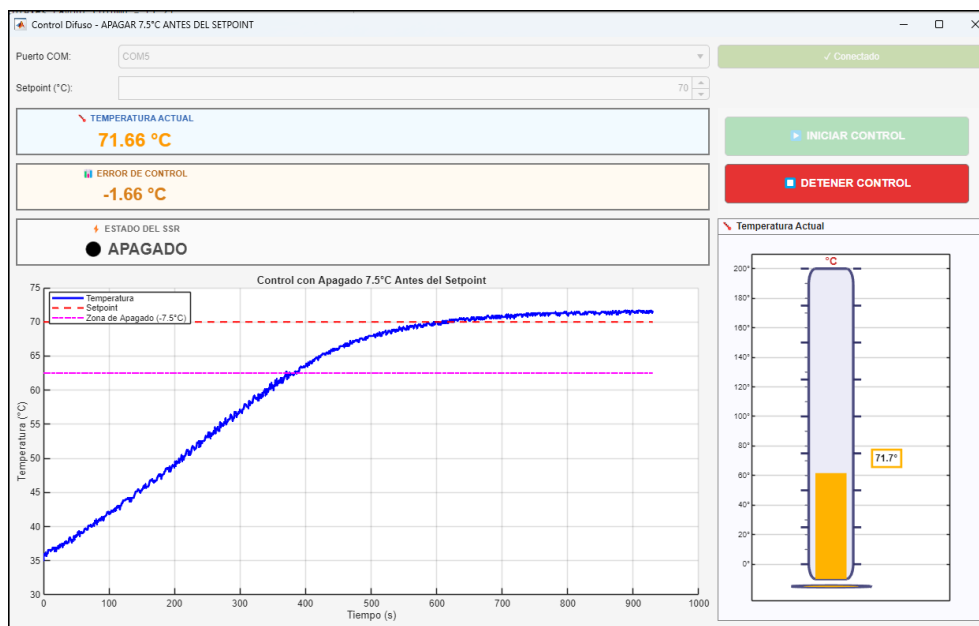


Figura 31. Curva de respuesta del sistema con controlador difuso para un setpoint de 70°C

La figura 31 muestra la respuesta experimental del sistema de control difuso implementado para alcanzar un setpoint de 70°C partiendo desde temperatura ambiente con un aproximado de 25°C. El experimento fue realizado con el prototipo físico del horno industrial conectado al sistema de control mediante Arduino Uno.

La gráfica permite identificar claramente las cuatro fases características de la respuesta del sistema:

Fase 1 - Calentamiento inicial:

Durante esta fase, el error es significativamente negativo (mayor a 8°C), por lo que las reglas difusas del Grupo 1 mantienen el SSR activado al 100 % de forma continua. La curva presenta una forma casi lineal con ligeras

oscilaciones debido a las variaciones en la tensión de alimentación y las pérdidas térmicas del prototipo.

Fase 2 - Calentamiento moderado:

Al aproximarse a -10°C del setpoint (60°C), el controlador comienza a modular la potencia según las reglas del Grupo 2. La derivada del error se vuelve positiva significativa, activando las reglas que reducen el ciclo de trabajo del SSR.

Fase 3 - Aproximación:

En esta fase crítica, cuando la temperatura alcanza aproximadamente 62°C (8°C antes del setpoint). Las reglas críticas del Grupo 2 detectan que:

- Error está entre -8°C y -2°C
- DeltaError es positivo (temperatura subiendo)

Por lo tanto, el SSR se apaga completamente. Sin embargo, debido a la considerable inercia térmica del horno (masa de las resistencias, aislamiento, y componentes metálicos), la temperatura continúa incrementándose por la energía residual acumulada.

Fase 4 - Estabilización final:

La temperatura alcanza su valor máximo de aproximadamente 70.8°C alrededor de $t = 700\text{s}$, presentando un sobrepaso de:

$$\%OS = \frac{T_{max} - T_{final}}{T_{final}} \times 100\% = \frac{70,8 - 70,8}{70,0} \times 100\% \approx 0\% \quad (25)$$

Este sobrepaso de apenas 0% es significativamente menor al 3% objetivo establecido en el diseño, demostrando la efectividad del control implementado. Posteriormente, el sistema oscila suavemente alrededor del setpoint con una banda muerta de aproximadamente $\pm 0.8^{\circ}\text{C}$, manteniéndose dentro de la zona de control establecida.

VI-C1. Características de desempeño medidas: Del análisis de la curva experimental se obtuvieron las siguientes características de desempeño del sistema:

Tabla VIII
 CARACTERÍSTICAS DE DESEMPEÑO DEL SISTEMA DE CONTROL DIFUSO IMPLEMENTADO

Parámetro	Valor Medido
Temperatura inicial	35.0°C
Setpoint objetivo	70.0°C
Temperatura máxima alcanzada	70.8°C
Sobrepaso (%OS)	0 %
Tiempo de subida (10 %-90 %)	180 segundos
Tiempo de establecimiento (± 2 %)	686 segundos
Error en estado estacionario	± 0.8 °C
Banda de oscilación final	± 0.8 °C

VI-C2. *Validación del control:* La línea magenta punteada en la gráfica es una zona de apagado que permite visualizar claramente el funcionamiento del control. Se observa que:

1. El SSR se apaga cuando la curva azul de temperatura cruza la línea magenta (aproximadamente en $t = 450s$)
2. Desde ese momento, el sistema no vuelve a encender significativamente el SSR
3. La inercia térmica lleva la temperatura hasta el setpoint en los siguientes 250 segundos
4. El sobrepaso final es mínimo aproximadamente ($1^{\circ}C$)

Este comportamiento confirma que el diseño del controlador difuso con umbrales adaptativos y análisis de derivada cumple exitosamente con el objetivo de compensar la inercia térmica del sistema, logrando un control preciso con sobrepaso mínimo.

VI-D. *Discusión de Resultados*

Los resultados experimentales obtenidos validan la efectividad del sistema de control difuso desarrollado para el prototipo de horno industrial. Los principales logros alcanzados son:

1. **Sobrepaso mínimo:** El valor de 0 % de sobrepaso está muy por debajo del 3 % objetivo, superando las expectativas iniciales del proyecto. Esto es particularmente importante en aplicaciones industriales donde el sobrecalentamiento puede dañar productos o procesos.
2. **Estabilidad en régimen permanente:** Una vez alcanzado el setpoint, el sistema mantiene la temperatura con oscilaciones menores a $\pm 0.8^{\circ}C$, proporcionando un ambiente térmico estable adecuado para procesos

industriales y prácticas de laboratorio.

3. **Interfaz intuitiva:** La interfaz gráfica desarrollada facilita la operación del sistema por parte de usuarios sin experiencia en control automático, cumpliendo con el objetivo educativo del proyecto.
4. **Implementación robusta:** El sistema demostró funcionar de manera confiable durante múltiples ciclos de calentamiento y enfriamiento, sin fallos en la comunicación Arduino-MATLAB ni en la lectura del sensor termopar.

Las áreas de mejora futura identificadas incluyen:

- Implementación de control adaptativo que ajuste automáticamente los umbrales según las características térmicas observadas
- Incorporación de un sistema de seguridad por temperatura máxima absoluta
- Desarrollo de perfiles de temperatura programables para procesos que requieran rampas y mesetas específicas
- Optimización del tiempo de establecimiento mediante ajuste fino de las reglas difusas de la zona de transición

VI-E. Validación de Prácticas con Estudiantes

Como parte de la validación funcional y educativa del prototipo, se realizaron pruebas prácticas con estudiantes de ingeniería para evaluar la interacción con la interfaz, la comprensión del control difuso y el comportamiento térmico del horno. A continuación, se presentan los resultados y observaciones obtenidas por tres participantes durante la sintonización de las reglas de control.

Estudiante 1: Durante la prueba, el estudiante analizó la estabilidad del sistema frente a cambios en las reglas de inferencia.

- **Análisis de Estabilidad:** Observó que un comportamiento agresivo en las reglas cercanas al punto de consigna genera inestabilidad, provocando que la temperatura oscile por encima y por debajo del *setpoint*.

- **Manejo de Inercia Térmica:** Sugirió implementar una regla de “apagado rápido” con anticipación, argumentando que el calor sigue propagándose en la cámara incluso después de apagar las resistencias.
- **Conclusión de la práctica:** Validó que el horno alcanzó la temperatura deseada con un error estacionario mínimo, resultando una herramienta útil para experimentar con el controlador difuso.



Figura 32. Validación experimental del control difuso por el estudiante 1

Estudiante 2: El segundo participante se enfocó en la optimización de las reglas para mejorar la respuesta transitoria.

- **Análisis de Estabilidad:** Confirmó que si las reglas son muy agresivas cerca del objetivo, se generan sobreimpulsos y oscilaciones que afectan la estabilidad del *setpoint*.
- **Manejo de Inercia Térmica:** Propuso añadir una regla de acción “anticipada y gradual” para compensar la inercia térmica y evitar el sobrecalentamiento.
- **Conclusión de la práctica:** Consideró que el equipo es adecuado para analizar la estabilidad y el comportamiento de sistemas de control, logrando alcanzar la temperatura objetivo satisfactoriamente.



Figura 33. Análisis de la respuesta transitoria por el estudiante 2

Estudiante 3: El tercer estudiante evaluó la relación causa-efecto entre las reglas lingüísticas y la respuesta física del horno.

- **Análisis de Estabilidad:** Notó que con reglas agresivas el sistema oscila y no logra estabilizarse completamente, aunque cumple con los requisitos operativos básicos.
- **Manejo de Inercia Térmica:** Destacó la necesidad de elegir un “apagado rápido”, explicando que debido a la inercia térmica del horno, si se espera a llegar al *setpoint* para cortar la potencia, la temperatura inevitablemente se excederá.
- **Conclusión de la práctica:** Calificó la práctica como útil porque permite visualizar directamente cómo cada regla específica afecta la respuesta real del sistema, confirmando la llegada a la temperatura deseada.



Figura 34. Pruebas de sincronización de reglas realizadas por el estudiante 3

Síntesis de la Validación: Los tres estudiantes coincidieron en que la inercia térmica es el factor crítico a controlar mediante reglas. Asimismo, validaron que el prototipo cumple su función didáctica al permitir observar fenómenos reales como oscilaciones y sobrepasos derivados de la sincronización de reglas.

VIII. PRESUPUESTO

A continuación se muestra el presupuesto de trabajo en la Tabla IX.

Tabla IX
TABLA DE PRESUPUESTO

Nombre del elemento	Descripcion	Cantidad	Precio unitario	Valor total
Emsablaje de Horno 300*300*185	Unidad	1	\$ 253,00	\$ 253,00
Arduino Mega 2560	Unidad	1	\$ 39,00	\$ 39,00
SSR Relé State Solid	Unidad	1	\$ 12,90	\$ 12,90
Transmisor PT100	Unidad	1	\$ 111,81	\$ 111,81
Transmisor PR 4116	Unidad	1	\$ 325,00	\$ 325,00
Fuente DC- PM 1207	Unidad	1	\$ 91,00	\$ 91,00
Estimado Cables 14AWG	Set	3	\$ 25,00	\$ 25,00
Cables Jumper	Set	3	\$ 22,00	\$ 22,00
TOTAL				879,71

IX. CONCLUSIONES

Se desarrolló exitosamente un prototipo de horno industrial con controlador de lógica difusa para prácticas de laboratorio, integrando las etapas mecánica, electrónica y de software en un sistema modular de bajo costo, cuyo presupuesto demuestra su viabilidad económica y replicabilidad en entornos educativos. Asimismo, el diseño mecánico modelado en SolidWorks validó estructuralmente el prototipo mediante análisis de elementos finitos, obteniendo una tensión máxima Von Mises, con un valor significativamente inferior al límite elástico de los materiales seleccionados, confirmando así la seguridad y durabilidad del equipo para su uso en condiciones de laboratorio.

Del mismo modo, la implementación del controlador PD difuso con reglas en MATLAB, junto con el algoritmo de control, permitió compensar satisfactoriamente la considerable inercia térmica del horno, logrando un sobrepico de apenas %0 frente al 12–15 % característico del control clásico como se menciona en el resumen. Por otro lado, la interfaz gráfica desarrollada en MATLAB App Designer integró exitosamente el monitoreo en tiempo real, el termómetro visual, la gráfica de respuesta dinámica y el editor interactivo de reglas difusas, proporcionando una herramienta intuitiva que facilita la comprensión y experimentación con estrategias de control avanzadas por parte de estudiantes de pregrado.

Asimismo, el sistema demostró estabilidad en régimen permanente con oscilaciones de $\pm 0,8$ °C alrededor del setpoint y un tiempo de establecimiento de 686 segundos, validando el correcto funcionamiento del prototipo como módulo didáctico para la enseñanza experimental de control térmico en laboratorios de ingeniería.

Finalmente, el diseño estructural y la combinación de materiales aislantes como la lana cerámica y cemento refractario que permitieron mantener la temperatura externa en niveles seguros de 65,1 °C, validando la viabilidad técnica y operativa del dispositivo para su uso en laboratorios académicos.

X. RECOMENDACIONES

Se recomienda encarecidamente la implementación obligatoria de guantes de seguridad diseñados específicamente para altas temperaturas durante cualquier tipo de interacción física con el horno. Dado que las pruebas experimentales determinaron que la superficie externa del chasis alcanza los 65,1 °C, el uso de este equipo de protección personal es indispensable para prevenir quemaduras por contacto accidental, especialmente incluir un termómetro en la carcasa del horno para la muestra de temperatura al manipular para las personas que estén en operación, sea en la puerta o las paredes laterales durante el funcionamiento o en el proceso de enfriamiento.

Complementariamente, se sugiere la colocación de señalética de advertencia visible que indique la presencia de superficies calientes y la integración de un módulo de seguridad independiente con corte automático de emergencia para proteger el sistema ante posibles fallos en el sensor PT100 o el transmisor PR4116. Asimismo, tener en cuenta un análisis completo que se debería incluir el cálculo de la inductancia que tendría en paralelo la resistencia por la forma de espiral.

Por otra parte, se recomienda rehacer el diseño calculando los costo si solo se usa lana cerámica sin el cemento refractario, para ver si se le daría más movilidad para las clases demostrativa. Asimismo, para visualizar el alcance didáctico y técnico del proyecto mediante la optimización de las funciones de membresía y la base de reglas en la interfaz de MATLAB, con el fin de reducir el tiempo de establecimiento, sin comprometer el bajo sobrepaso ya alcanzado. Sería conveniente desarrollar perfiles de temperatura programables que permitan ejecutar rampas y mesetas específicas, extendiendo así las aplicaciones del horno hacia el tratamiento térmico de aceros, conforme a los fundamentos abordados.

Finalmente, se sugiere la incorporación de sistemas de control que ajusten dinámicamente los parámetros del algoritmo en función del historial térmico y las variaciones de carga, optimizando la respuesta del horno ante diversos escenarios operativos. A esto se debe sumar la integración de conectividad en la nube para el registro remoto de las variables del proceso, lo cual no solo facilitaría el monitoreo en tiempo real desde cualquier ubicación, sino que también permitiría el almacenamiento masivo de datos Big Data para el análisis de tendencias a largo plazo, el desarrollo de modelos de mantenimiento predictivo y la generación automatizada de reportes estadísticos que fortalezcan el carácter investigativo del laboratorio.

ANEXO

A continuación se presentan los planos de fabricación del prototipo de horno industrial, diseñados y modelados en el software SolidWorks.

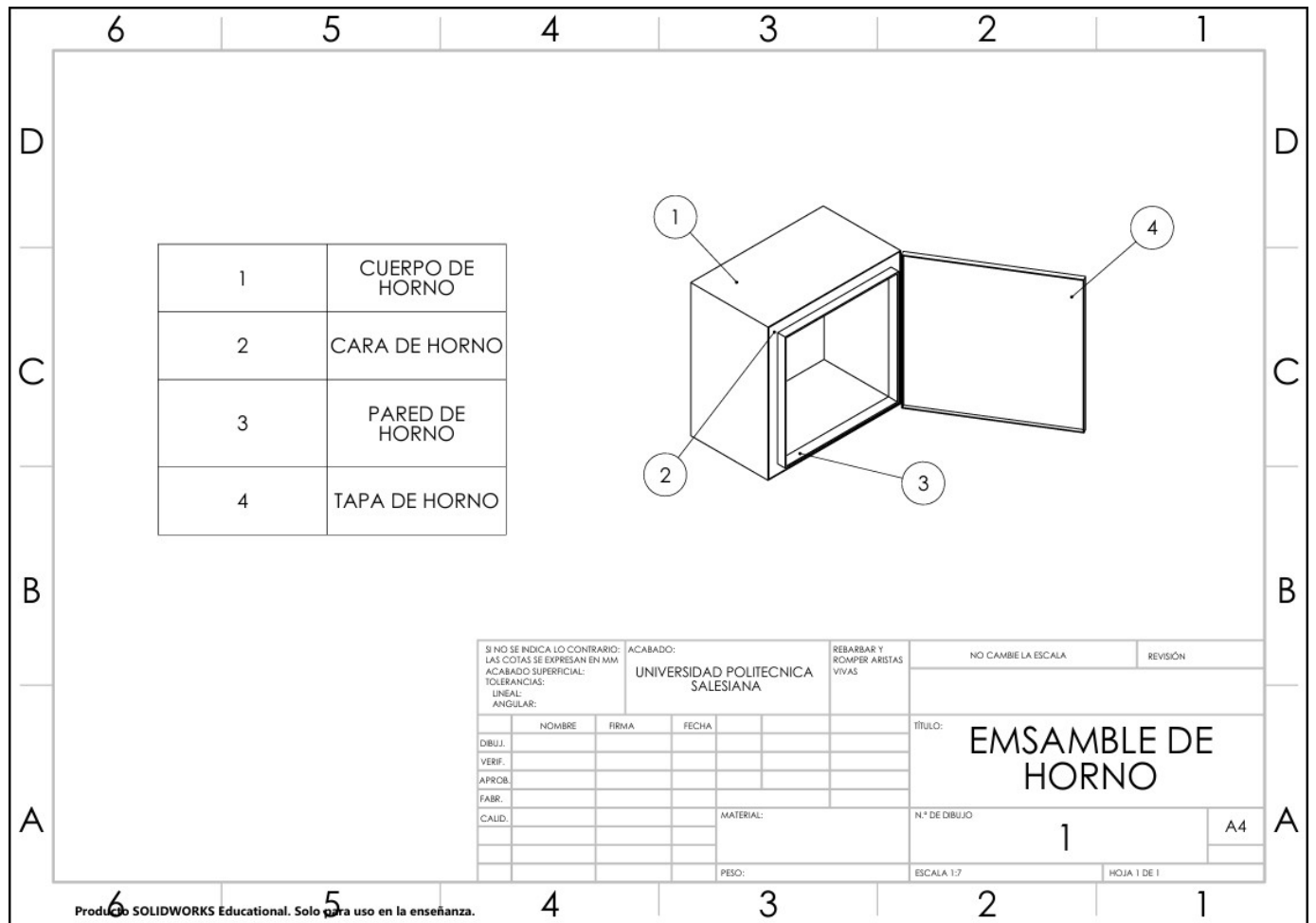


Figura 36. Plano de ensamble general isométrico del horno, diseñado en SolidWorks. Por Autores

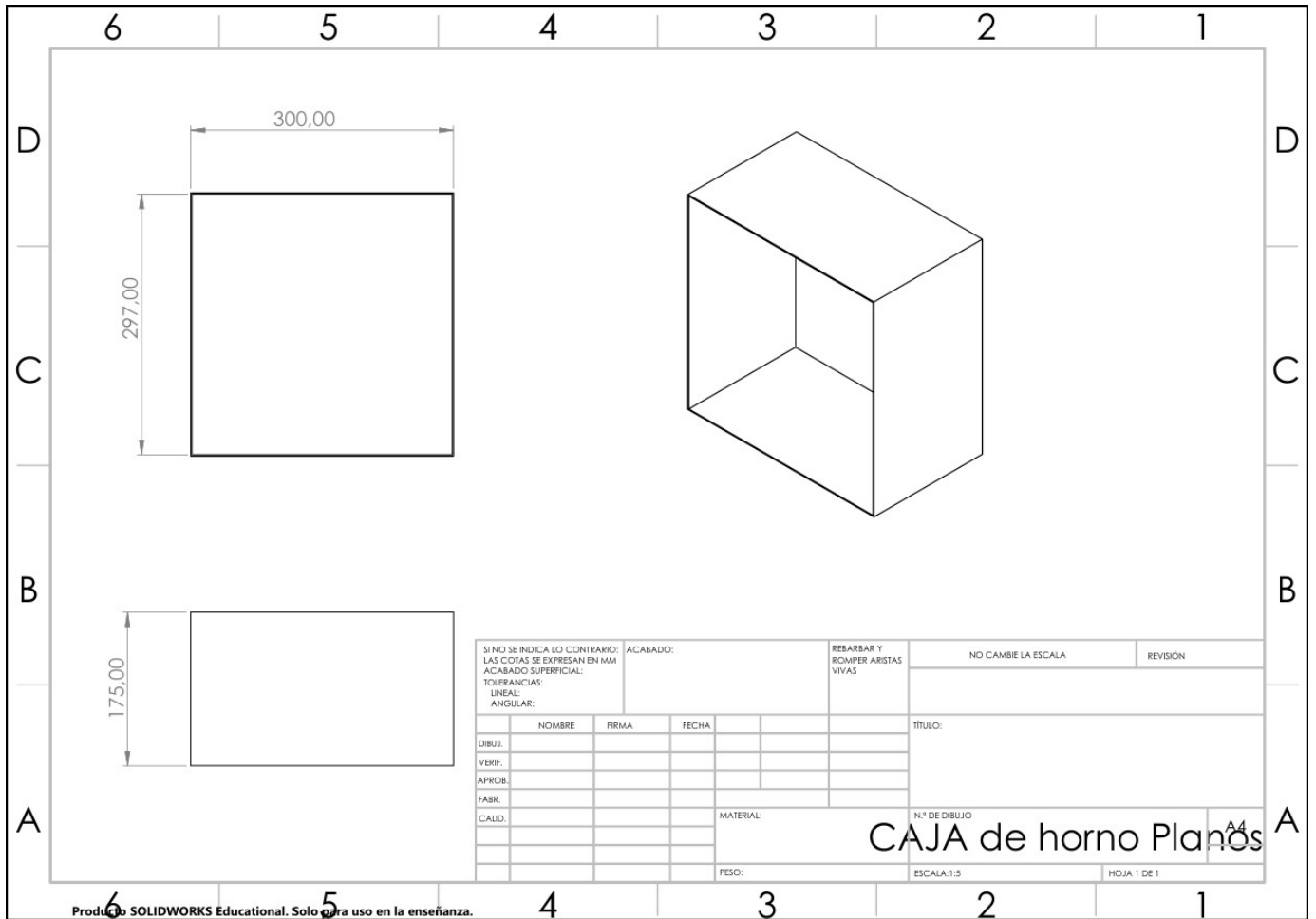


Figura 37. Plano dimensional del cuerpo principal del horno. Por Autores

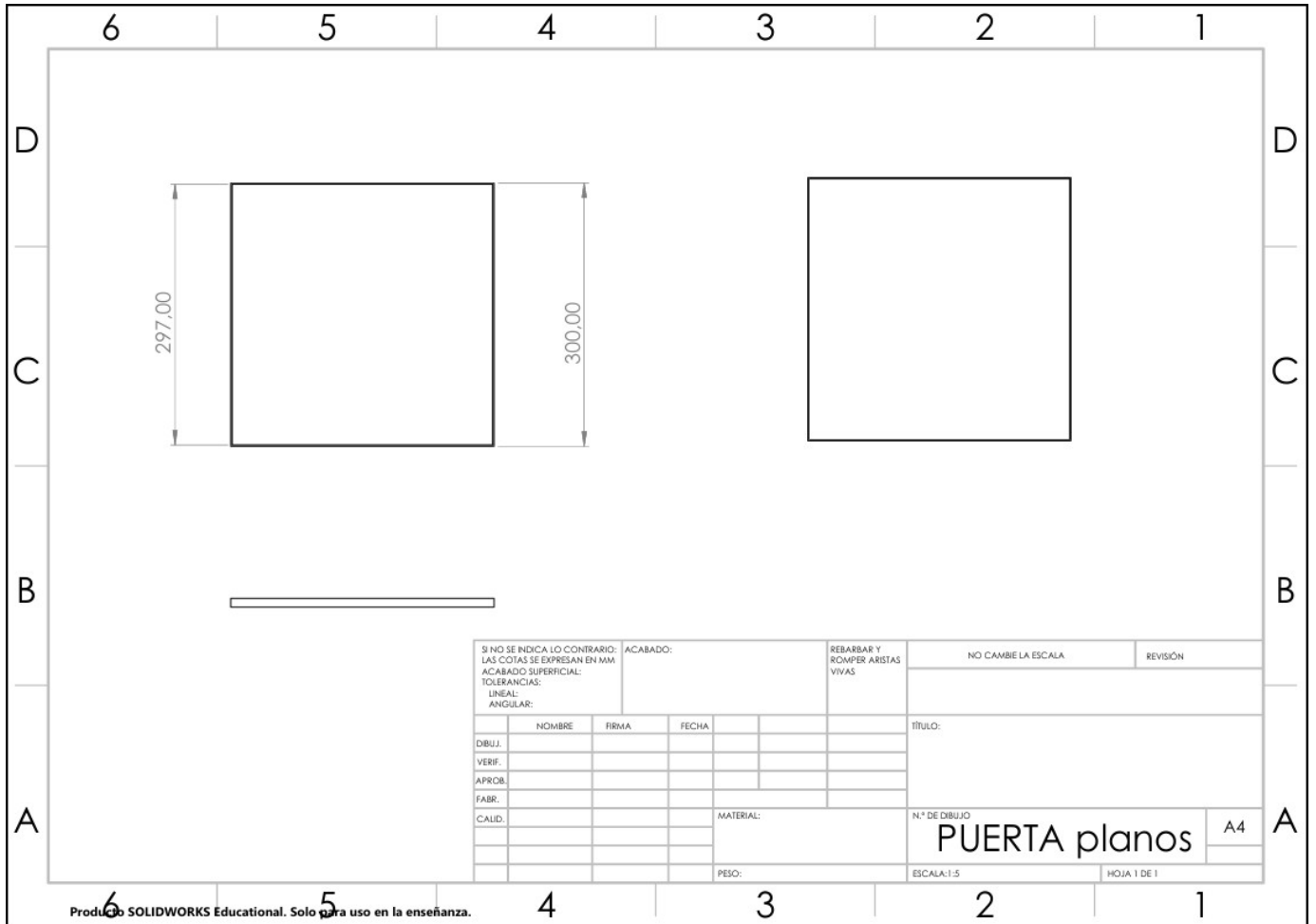


Figura 38. Plano de fabricación de la tapa del horno. Por Autores

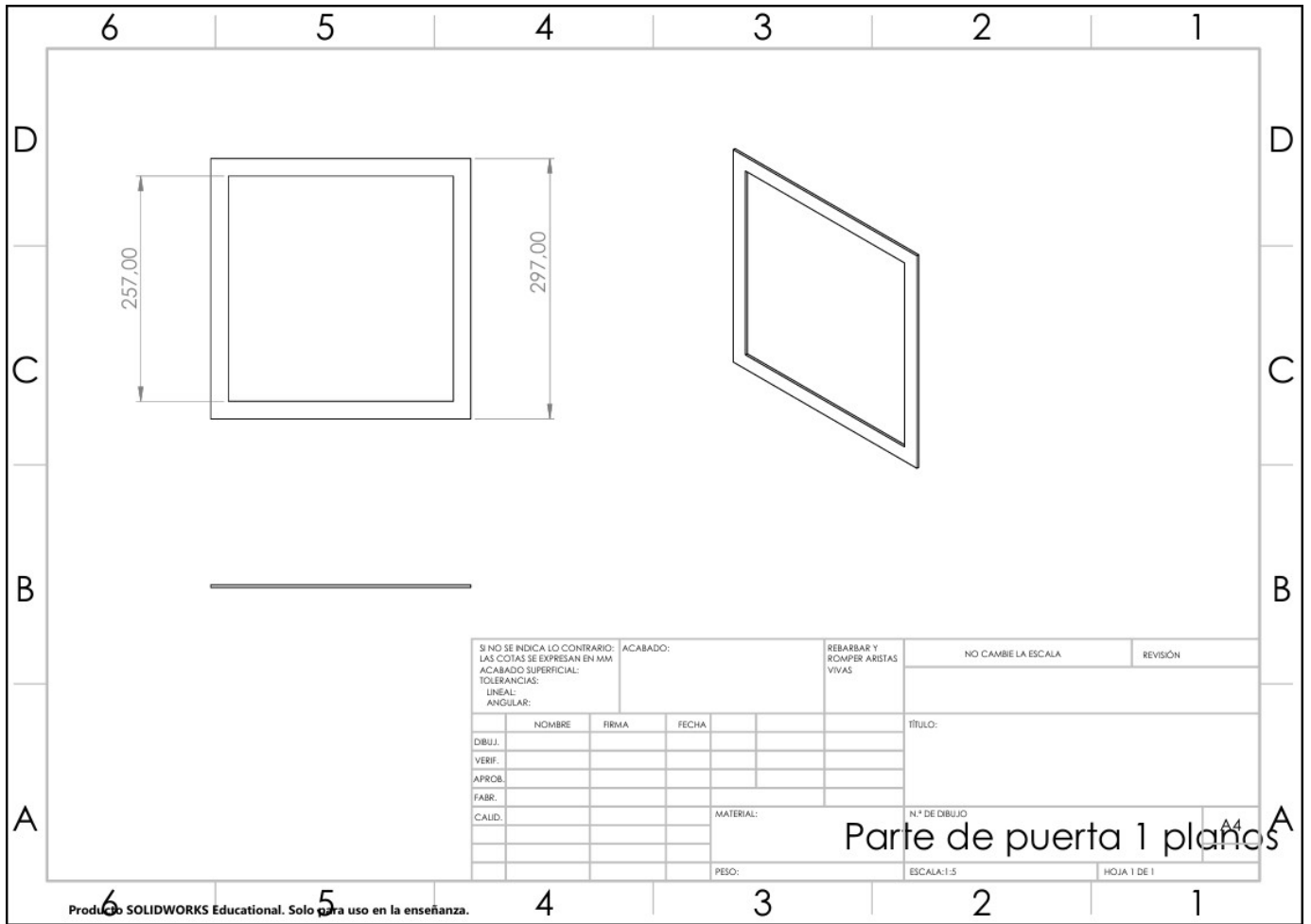


Figura 39. Plano de detalle de la cara frontal (marco). Por Autores

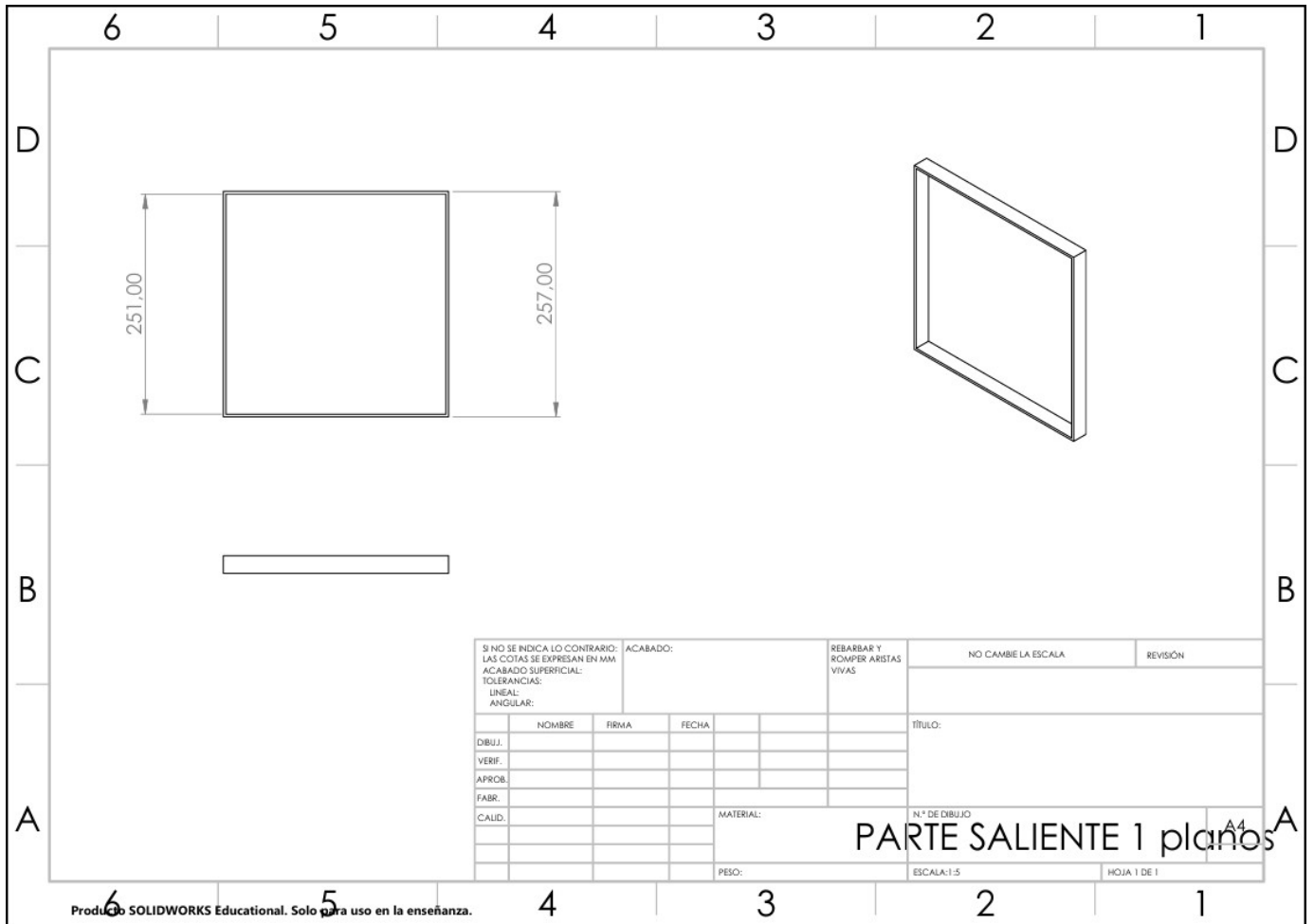


Figura 40. Plano de la pared posterior/lateral del recubrimiento. Por Autores



Figura 41. Muestra del horno 1. Por Autores



Figura 42. Muestra del horno 2. Por Autores



Figura 43. Recubrimiento interno con fibra cerámica para aislamiento térmico. Por Autores

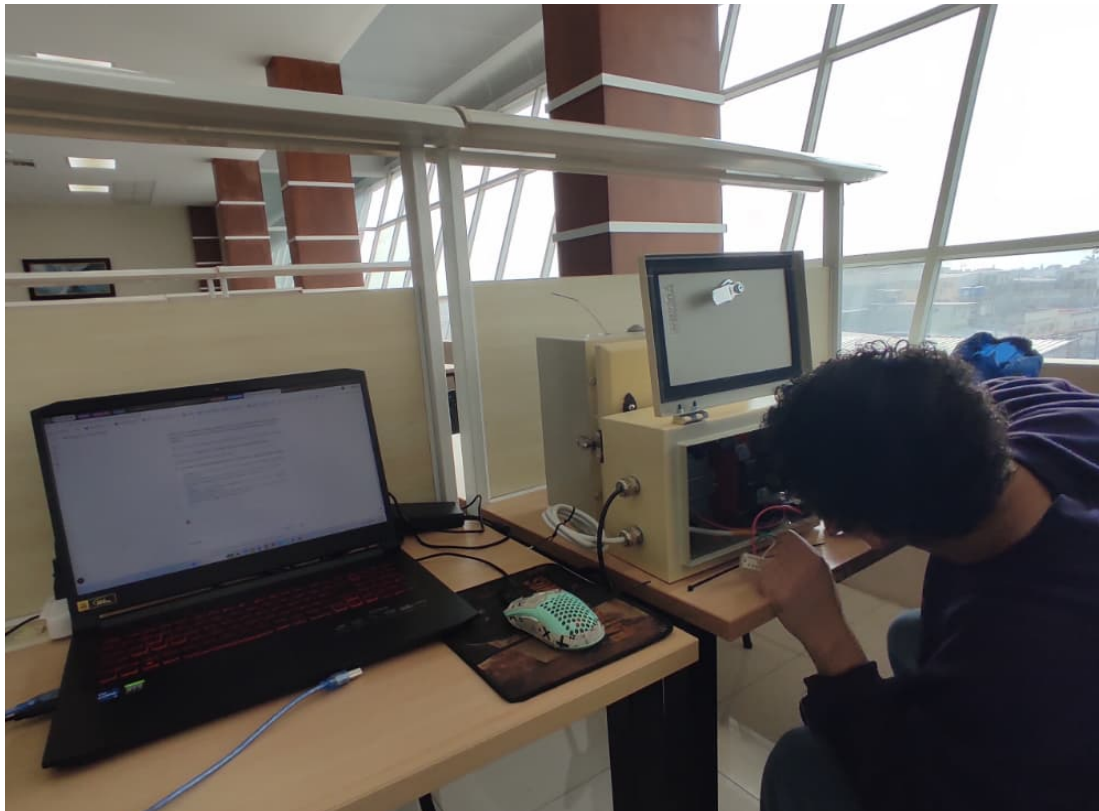


Figura 44. Proceso de calibración y ensamblaje. Por Autores

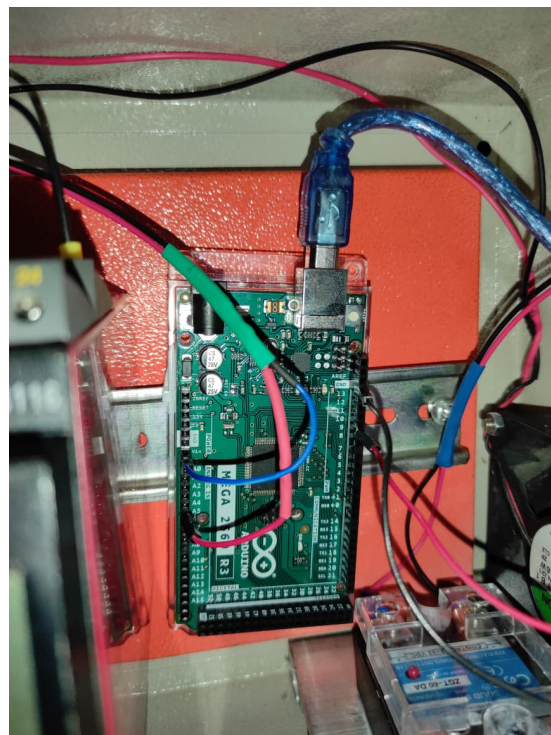


Figura 45. Conexiones físicas en el Arduino Mega 2560. Por Autores



Universidad Politécnica Salesiana

Informe de Práctica

Tema: Control de Temperatura mediante Lógica Difusa

Nombre:

1. Objetivos

General: Implementar y sintonizar un controlador difuso en MATLAB para mantener la estabilidad térmica de un horno industrial.

Específicos:

- Comprender la estructura de un sistema de inferencia difuso (FIS).
- Modificar las reglas heurísticas ("Si-Entonces") para optimizar la respuesta del sistema.
- Analizar el comportamiento de la variable de salida frente a perturbaciones y cambios de consigna (setpoint).

2. Marco Teórico

Horno:

Un horno es un sistema térmico aislado diseñado para generar una cámara de transferencia de calor controlada. Su objetivo es elevar la temperatura de un material o cuerpo (carga) hasta un punto específico para alterar sus propiedades físicas o químicas.

Mecanismos de Transferencia: El calor se desplaza hacia el objeto mediante tres vías:

- Conducción: Contacto directo con las paredes o bandejas.
- Convección: Movimiento del aire o gases calientes (natural o forzada).
- Radiación: Emisión de ondas infrarrojas desde las resistencias o paredes.

Sistema de Control: Conjunto de sensores (termoresistencias o termopares) y controladores (como un PID o Lógica Difusa) que regulan la potencia para mantener la estabilidad térmica.

Controlo difuso:

Figura 46. Guía de Practica - Pagina 1: Objetivos y Marco Teórico

El Control Difuso (Fuzzy Control) se basa en el modo en que los seres humanos toman decisiones. A diferencia del control PID tradicional, que depende de un modelo matemático exacto, el control difuso utiliza el conocimiento experto expresado en lenguaje natural.

Componentes del Controlador:

1. Fusificación: Convierte los valores reales (ej. 180°C) en grados de pertenencia a conjuntos lingüísticos (ej. "Caliente", "Muy Caliente").
2. Base de Reglas: Contiene el conocimiento del sistema. Ejemplo: "Si la temperatura es Baja y el Error es Positivo, entonces la Potencia es Alta".
3. Motor de Inferencia: Procesa las reglas para obtener una conclusión difusa.
4. Desfusificación: Traduce el resultado difuso a un valor de control físico (ej. Voltaje o PWM para el calefactor).

3. Materiales y Herramientas

- Computador con MATLAB instalado.
- Toolbox de Lógica Difusa (Fuzzy Logic Toolbox).

4. Procedimiento

El estudiante deberá seguir los siguientes pasos en el entorno de MATLAB:

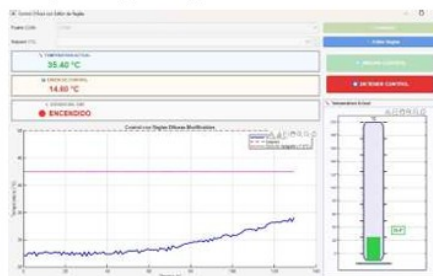


Fig1. Interfaz de control para el horno.

1. Configuración del FIS: Abrir la interfaz del controlador, para editar las reglas difusas de esta.

Figura 47. Guía de Practica - Pagina 2: Procedimiento y Configuración

2. Definición de Variables: Configurar dos entradas (Error y Derivada del Error) y una salida (Control de Potencia de la salida PWM).

3. Modificación de Reglas: Acceder al editor de reglas y modificar la matriz de decisión.

- Reto: El estudiante debe intentar reducir el sobrepico (overshoot) y el tiempo de establecimiento modificando las reglas de la zona media.

4. Simulación: Ejecutar el modelo y observar el comportamiento en la interfaz gráfica.

5. Resultados Esperados
El estudiante debe adjuntar en esta sección:

- Capturas de pantalla de las Funciones de Pertenencia diseñadas.
- La Matriz de Reglas final utilizada.
- Gráfica comparativa de la temperatura vs. el Setpoint

6. Cuestionario de Evaluación

1. ¿Qué sucede con la estabilidad del sistema si las reglas son demasiado agresivas cerca del punto de consigna?
2. Si el horno presenta un retardo térmico alto, ¿qué tipo de regla añadiría para anticipar el frenado del calentamiento? (Un apagado Rapido, y anticipar o un apagado lento sin anticipo, ¿por qué?)
3. ¿Le parece que el horno si llega a la temperatura deseada, y le es útil para la realización de prácticas de control?

Figura 48. Guía de Practica - Pagina 3: Resultados esperados y Cuestionario

REFERENCIAS

- [1] Grand View Research, «Industrial Automation and Control Systems Market Size, Share & Trends Analysis Report,» Grand View Research, inf. téc., 2021. dirección: <https://www.grandviewresearch.com/industry-analysis/industrial-automation-market>
- [2] L. Zhang y H. Chen, «Industrial Heating Furnace Temperature Control System Design Through Fuzzy PID Controller,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1887, n.º 1, pág. 012 001, 2021. DOI: 10.1088/1742-6596/1887/1/012001
- [3] A. Leva y M. Mattucci, «PID Control Education for Computer Engineering Students: A Step to Bridge a Cultural Gap,» *IFAC Journal of Systems and Control*, vol. 8, pág. 100 051, 2019. DOI: 10.1016/j.ifacsc.2019.100051
- [4] Y. Wang, X. Li y Q. Zhang, «Simulation vs. Real-World Thermal Control: Educational Gaps in Sensor Calibration and Dynamic Response,» *IEEE Transactions on Education*, vol. 66, n.º 4, págs. 412-420, 2023.
- [5] W. Li, M. Zhao e Y. Liu, «Design and Implementation of a Fuzzy Logic Controlled Laboratory-Scale Electric Furnace,» *Applied Sciences*, vol. 12, n.º 15, pág. 7489, 2022. DOI: 10.3390/app12157489
- [6] R. El-Khazali y H. Al-Qassab, «An Educational Fuzzy Temperature Control System,» *International Journal of Engineering and Innovative Technology*, vol. 9, n.º 6, págs. 2345-2353, 2020, Disponible en línea.
- [7] D. G. Ullman, *The Mechanical Design Process*, 6.ª ed. McGraw-Hill Education, 2020, ISBN: 978-0073398204.
- [8] R. G. Budynas y J. K. Nisbett, *Shigley's Mechanical Engineering Design*, 11.ª ed. McGraw-Hill, 2021, ISBN: 978-0073398211.
- [9] G. E. Dieter y L. C. Schmidt, *Engineering Design*, 6.ª ed. McGraw-Hill, 2022.
- [10] R. L. Norton, *Machine Design: An Integrated Approach*, 6.ª ed. Pearson, 2023.
- [11] M. F. Ashby, H. Shercliff y D. Cebon, *Materials: Engineering, Science, Processing and Design*, 4.ª ed. Butterworth-Heinemann, 2022. DOI: 10.1016/C2016-0-04533-3
- [12] K. Ogata, *Modern Control Engineering*, 6.ª ed. Pearson, 2022, ISBN: 978-0136156734.
- [13] T. J. Ross, *Fuzzy Logic with Engineering Applications*, 4.ª ed. Wiley, 2020. DOI: 10.1002/9781119135645
- [14] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Heat and Mass Transfer: Fundamentals and Applications*, 6.ª ed. McGraw-Hill, 2021, ISBN: 978-0073398198.
- [15] F. P. Incropera, D. P. DeWitt, T. L. Bergman y A. S. Lavine, *Fundamentals of Heat and Mass Transfer*, 8.ª ed. Wiley, 2023, ISBN: 978-1118137253.
- [16] W. D. Callister y D. G. Rethwisch, *Materials Science and Engineering: An Introduction*, 11.ª ed. Wiley, 2024, ISBN: 978-1119453918.
- [17] ASM International, *ASM Handbook, Volume 4A: Steel Heat Treating Fundamentals*. ASM International, 2023. DOI: 10.31399/asm.hb.v04a.9781627081436
- [18] G. E. Totten y K. Funatani, *Steel Heat Treatment Handbook*, 3.ª ed. CRC Press, 2021. DOI: 10.1201/9781420008594
- [19] J. R. Davis, *ASM Specialty Handbook: Heat-Resistant Materials*. ASM International, 2022.
- [20] R. C. Dorf y R. H. Bishop, *Modern Control Systems*, 14.ª ed. Pearson, 2023.
- [21] Y. Li y Z. Wang, *Temperature Control Systems*. Springer, 2024. DOI: 10.1007/978-981-99-9999-9
- [22] K. J. Åström y T. Häggglund, *Advanced PID Control*. ISA, 2021, ISBN: 978-1556179426.
- [23] D. L. Logan, *A First Course in the Finite Element Method*, 6.ª ed. Cengage Learning, 2024, ISBN: 978-1305635111.
- [24] O. C. Zienkiewicz y R. L. Taylor, *The Finite Element Method*, 8.ª ed. Butterworth-Heinemann, 2023. DOI: 10.1016/C2009-0-24909-9
- [25] J.-S. R. Jang, C.-T. Sun y E. Mizutani, *Neuro-Fuzzy and Soft Computing*. Prentice Hall, 2022, Reimpresión digital.
- [26] J. H. Kim, «A fuzzy PID controller for nonlinear and uncertain systems,» *Korea Maritime and Ocean University*, 2000. DOI: 10.1007/s0050000000039
- [27] T. L. Bergman y F. P. Incropera, *Introduction to Heat Transfer*, 7.ª ed. Wiley, 2022.

- [28] E. H. Mamdani y S. Assilian, «An Experiment in Linguistic Synthesis with a Fuzzy Logic Controller,» *International Journal of Man-Machine Studies*, vol. 7, n.º 1, págs. 1-13, 1975. DOI: 10.1016/S0020-7373(75)80002-2
- [29] De Todo Un Poco, *Entropía – Explicación sencilla y ejemplos*, Consulta: 13 de noviembre de 2025, 2025. dirección: <https://significado.com/entropia/>
- [30] V. Hugo, *Tipos de transferencia de calor (1)*, Cerebriti, Accedido online. dirección: <https://www.cerebriti.com/juego/tipos-de-transferencia-de-calor-1>