



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA
SEDE GUAYAQUIL
CARRERA DE MECATRÓNICA**

**DESARROLLO DE UNA PLANTA PARA CONTROL DE
TEMPERATURA CON DISTINTAS INTERFACES DE CONEXIÓN
COMO INDUSTRIAL Y SISTEMAS EMBEBIDOS**

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

AUTORES: Ayrton Leandro Ochoa Bernabé
Melissa Johanna Salazar Benites
TUTOR: Alberto Santiago Ramírez Farfán

Guayaquil - Ecuador

2026

CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Nosotros, **Ayrton Leandro Ochoa Bernabé** con documento de identificación N° **0954605705** y **Melissa Johana Salazar Benites** con documento de identificación N° **0950481135**; 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, 2 de marzo del año 2026

Atentamente,



Ayrton Leandro Ochoa Bernabé
0954605705



Melissa Johana Salazar Benites
0950481135

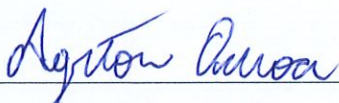
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA
UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Nosotros, **Ayrton Leandro Ochoa Bernabé** con documento de identificación N° **0954605705** y **Melissa Johana Salazar Benites** con documento de identificación N° **0950481135**, 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 UNA PLANTA PARA CONTROL DE TEMPERATURA CON DISTINTAS INTERFACES DE CONEXIÓN COMO INDUSTRIAL Y SISTEMAS EMBEBIDOS**, 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, 2 de marzo del año 2026

Atentamente,



Ayrton Leandro Ochoa Bernabé
0954605705



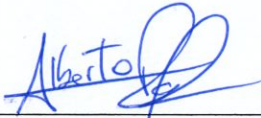
Melissa Johana Salazar Benites
0950481135

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, **Alberto Santiago Ramírez Farfán**, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: **DESARROLLO DE UNA PLANTA PARA CONTROL DE TEMPERATURA CON DISTINTAS INTERFACES DE CONEXIÓN COMO INDUSTRIAL Y SISTEMAS EMBEBIDOS**, realizado por **Ayrton Leandro Ochoa Bernabé** con documento de identificación N° **0954605705** y por **Melissa Johana Salazar Benites** con documento de identificación N° **0950481135**, 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, 2 de marzo del año 2026

Atentamente,



Ing. Alberto Santiago Ramírez Farfán, Mg.

0923348890

DEDICATORIA

Este trabajo está dedicado a mi madre y mi padre, que me criaron y me inculcaron buenos valores para llegar a ser la persona que soy hoy en día, y estuvo conmigo a pesar de lo difícil que fue todo el proceso.

A mi abuela que es mi mayor fuente de apoyo, su amor incondicional me dió fuerzas para seguir cuando ya no podía más.

A mis hermanos que son mis guías en todo este camino, para seguir creciendo más y más a su lado como profesionales y ser un ejemplo de vida para mí hermana menor. A mí novia que estuvo conmigo en toda esta etapa de mi vida y me impulsa constantemente a ser mejor y superarme. Y por último a mi mascota que fue mi fiel compañera esperando cada noche a que llegue a casa.

Ayton Leandro Ochoa Bernabé

Este trabajo de titulación está dedicado con profundo amor y gratitud a mi madre, Wendly Johana Benites Crusellas, quien ha sido mi motor y la razón constante de mi superación personal. Cada uno de sus esfuerzos y sacrificios encuentran su recompensa en la culminación de esta etapa de mi vida.

A mi abuela, Juana Marina Crusellas Haro, cuyas palabras de aliento, cariño y motivación constante me brindaron la seguridad necesaria para creer en mi potencial y convertirme en la persona que soy hoy.

Finalmente, a mi familia materna y a mi mascota por ser la mejor familia y la luz de mi vida; a mi padre, Osvaldo Abdón Salazar Villacrés, por el apoyo brindado para la realización de mis estudios universitarios.

Melissa Johana Salazar Benites

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios por darme fuerzas día a día para poder seguir adelante a pesar de todas esas largas jornadas del día.

A mí familia por ese sacrificio constante de ayudarme en todo lo que necesitaba y estar para mí en todo momento. A mí novia por estar para mí en todo momento y por recordarme frecuentemente lo que hemos logrado y lo que nos espera.

A todos mis amigos que compartimos el mismo camino para ser profesionales y formar buenas amistades. Agradezco a todas esas personas que estuvieron para mí en todo esta etapa de mi vida y lograron dejar su huella en mí, demostrando que la distancia nunca será pretexto para demostrar apoyo y amor.

Ayrton Leandro Ochoa Bernabé

Agradezco a Dios, por ser mi guía; y a mi familia, mi mascota y amigos, por su amor incondicional, apoyo y la confianza depositada en mí desde el primer día. Gracias por ser mi soporte fundamental.

Agradezco mis maestros del bachillerato, quienes a través de su vocación y enseñanza despertaron en mí el interés por la ingeniería, una elección que hoy me llena de satisfacción y orgullo.

Agradezco a la Universidad Politécnica Salesiana y a sus docentes, por ser pilares fundamentales en mi formación profesional. Gracias por brindarme las herramientas, el conocimiento y el acompañamiento necesario para enfrentar con éxito los retos de mi futuro laboral.

Melissa Johana Salazar Benites

I. RESUMEN

Este trabajo de titulación se sumerge en el diseño, desarrollo y materialización de una planta didáctica para el control de temperatura, concebida no solo como un proyecto técnico, sino como una respuesta necesaria para acercar el aprendizaje académico a la realidad que se vive hoy en día en la industria. La iniciativa surge al detectar una situación común en la formación de ingeniería: el vacío que queda entre las fórmulas abstractas del control y el momento de enfrentarse a equipos reales, los cuales deben soportar el uso constante y las condiciones exigentes de un laboratorio.

Por esta razón, se propuso la creación de un sistema que logre la validación de lectura de temperatura mediante un setpoint y medir las variables y enviar sus datos por vía serial, con la flexibilidad que ofrecen los sistemas electrónicos modernos de bajo costo.

A lo largo del proceso, se puso un cuidado especial en que cada pieza seleccionada tuviera un sentido práctico y duradero. No se trató solo de conectar componentes, sino de asegurar, por ejemplo, que el uso de una termocupla tipo K o la implementación de un sistema de ventilación forzada fueran soluciones reales para proteger el equipo y garantizar datos precisos.

El resultado final es una plataforma que invita a estudiantes y futuros ingenieros a interactuar con algoritmos de control PID de forma directa y sin miedos, eliminando las barreras económicas que suelen acompañar a los equipos industriales cerrados. En última instancia, este proyecto busca demostrar que, cuando la ingeniería se diseña con rigor y con el estudiante en mente, es posible transformar materiales sencillos en una herramienta inteligente que realmente prepare a las nuevas generaciones para los retos tecnológicos.

Palabras claves: sistemas embebidos, Control de temperatura, Simulación térmica, Ingeniería aplicada, Formación técnica, MATLAB, LabVIEW, Arduino Uno.

ABSTRACT

This degree project delves into the design, development, and implementation of an educational plant for temperature control, conceived not only as a technical project, but also as a necessary response to bring academic learning closer to the reality of today's industry. The initiative arose from the detection of a common situation in engineering education: the gap between abstract control formulas and the moment of dealing with real equipment, which must withstand constant use and the demanding conditions of a laboratory.

For this reason, the creation of a system was proposed that would validate temperature readings using a setpoint, measure variables, and send data via serial connection, with the flexibility offered by modern, low-cost electronic systems.

Throughout the process, special care was taken to ensure that each selected component had a practical and lasting purpose. It was not just a matter of connecting components, but of ensuring, for example, that the use of a type K thermocouple or the implementation of a forced ventilation system were real solutions to protect the equipment and guarantee accurate data.

The end result is a platform that invites students and future engineers to interact with PID control algorithms directly and without fear, eliminating the economic barriers that often accompany closed industrial equipment. Ultimately, this project seeks to demonstrate that when engineering is designed with rigor and with the student in mind, it is possible to transform simple materials into a smart tool that truly prepares new generations for technological challenges.

Keywords: embedded systems, temperature control, thermal simulation, applied engineering, technical training, MATLAB, LabVIEW, Arduino Uno.

ÍNDICE GENERAL

I.	Resumen	7
II.	Introducción	1
III.	Problema	2
IV.	Justificación	3
V.	Objetivos	4
V-A.	Objetivo general	4
V-B.	Objetivos específicos	4
VI.	Marco Teórico	5
VI-A.	Sistemas de control	5
VI-A1.	Principio de realimentación	5
VI-A2.	Sistema de control lazo cerrado	5
VI-A3.	Sistema de control lazo abierto	5
VI-A4.	Sistemas de control de temperatura	5
VI-A5.	Sistema de primer orden	5
VI-B.	Controladores PID y algoritmos de control	6
VI-B1.	Algoritmos de control	6
VI-B2.	Control proporcional	6
VI-B3.	Control proporcional integral	6
VI-B4.	Control proporcional integral derivativo	6
VI-B5.	Sensores y transductores	7
VI-B6.	Error	7
VI-B7.	Exactitud	7
VI-B8.	Sensibilidad	7
VI-B9.	Error por no linealidad	7
VI-B10.	Error por histéresis	7
VI-B11.	Estabilidad	7
VI-B12.	Resolución	7
VI-C.	Adquisición de señal	7
VI-C1.	Adquisición de señal	7
VI-C2.	Análisis y comparativa de sensores de temperatura	7
VI-C3.	Módulo MAX6675	10
VI-D.	Acondicionamiento de señal	11
VI-D1.	Acondicionamiento de señal	11
VI-D2.	Amplificación	11
VI-D3.	Amplificador inversor	11
VI-D4.	Amplificador no inversor	11
VI-D5.	Amplificador comparador	11
VI-D6.	Filtrado	12
VI-D7.	Filtro Paso-bajo	12
VI-D8.	Filtro Paso-alto	12
VI-D9.	Modulación PWM	13
VI-D10.	Duty cycle	13
VI-E.	Etapas de potencia y control de carga	13
VI-E1.	Optoacoplador PC817 - MOC3041	13

VI-E2.	MOC3041	14
VI-F.	Interfaces de Hardware y Sistemas Embebidos	15
VI-F1.	Interfaces de Hardware	15
VI-F2.	Arduino	15
VI-F3.	Software MATLAB	16
VI-G.	Software SolidWorks	16
VI-H.	Componentes de carga	17
VI-H1.	Elemento calefactor	17
VI-H2.	Actuador de enfriamiento	17
VI-I.	Gabinete industrial	18
VI-J.	Propiedades del acero	18
VI-J1.	Dureza	19
VI-J2.	Resistencia	19
VI-J3.	Maleabilidad	19
VI-J4.	Tenacidad	20
VI-J5.	Ductilidad	20
VI-J6.	Elasticidad	20
VI-J7.	Soldabilidad	20
VI-K.	Propiedades mecánicas del acero	21
VI-L.	Definición de Acero laminado en frío	21
VI-M.	Análisis de transferencia de calor en gabinetes industriales	22
VI-M1.	Transferencia de calor por conducción y resistencia del recubrimiento del gabinete	22
VI-M2.	Influencia de la emisividad en la disipación por radiación	22
VI-M3.	Irregularidad superficial y convección forzada	23
VI-N.	Resistencia del acero al carbono	23
VI-N1.	Resistencia mecánica	23
VI-N2.	Resistencia al calor	23
VI-Ñ.	Comparación de propiedades del acero al carbono	24
VI-Ñ1.	Propiedades mecánicas	24
VI-Ñ2.	Propiedades físicas	24
VI-O.	Definición de policarbonato	24
VI-P.	Propiedades del policarbonato	25
VI-P1.	Propiedades mecánicas	25
VI-P2.	Propiedades térmicas	26
VI-P3.	Propiedades físicas	26
VII.	Marco Metodológico	27
VII-A.	Diagrama de flujo	27
VII-B.	Diseño de prototipo	28
VII-C.	Enfoque de investigación	28
VII-D.	Diseño electrónico de Rectificador de media onda controlado monofásico, con cruce por cero y aislamiento	28
VII-D1.	Entrada AC y protección	28
VII-E.	Detección de cruce por cero con aislamiento	28
VII-F.	Generador de rampa	29
VII-G.	Comparador de fase	29
VII-H.	Generador de gate	29
VII-I.	Actuador conmutado SCR + Carga	29
VII-I1.	Variable de referencia	29
VII-I2.	Controlador Arduino	29

VII-I3.	Modulación PWM	29
VII-I4.	Filtro paso bajo RC	30
VII-I5.	Acondicionamiento + escala	30
VII-I6.	Planta térmica	30
VII-I7.	Sensor MAX	30
VII-I8.	Sistema rectificador de fase	30
VII-I9.	Sistema control digital	30
VII-I10.	Switch de selección	30
VII-I11.	Etapa de potencia	30
VII-I12.	Generación de pulso de disparo	31
VII-I13.	Diseño electrónico para lectura de temperatura	31
VII-I14.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	32
VII-J.	Fase de Diseño y fabricación del PCB	32
VII-J1.	Selección de herramienta de diseño	32
VII-J2.	Diseño esquemático	32
VII-J3.	Diseño PCB	35
VII-K.	Fase de Diseño y Modelado de la Planta	36
VII-K1.	Diseño Estructural	36
VII-K2.	Caracterización del material y propiedades físicas	37
VII-L.	Escalamiento de la señal de temperatura a PWM	38
VII-M.	Obtención de la ecuación de escalamiento	38
VII-N.	Cálculo de la pendiente	39
VII-Ñ.	Cálculo de la ordenada al origen	39
VII-O.	Ecuación final de conversión	39
VII-P.	Implementación digital	40
VII-Q.	Conversión del PWM a voltaje analógico	40
VII-R.	Escalamiento mediante amplificador operacional	40
VII-S.	Unión de lo digital con lo manual	40
VII-S1.	Enfoque de diseño del prototipo	40
VII-S2.	Diseño del uso de doble microcontrolador	41
VII-S3.	Software y gestión de datos	41
VII-T.	Análisis para una señal estable	42
VII-T1.	Acondicionamiento de Señal	42
VII-T2.	Configuración y conexión física del sistema analógico	42
VII-T3.	Configuración y conexión física del sistema digital	42
VII-T4.	Lógica de interconexión y comunicación de microcontrolador	42
VII-U.	Control de potencia y switch de selección	43
VII-U1.	Integración del selector de modo Ojo de Cangrejo	43
VII-U2.	Diseño y desarrollo de la etapa de potencia	43
VII-U3.	Gestión del selector Ojo de Cangrejo	43
VII-V.	Diseño y análisis de estructura	44
VII-V1.	Estudio funcional del gabinete	44
VII-V2.	Análisis del comportamiento térmico	45
VII-W.	Ensamblaje y pruebas	45
VII-W1.	Ensamblaje de prototipo	45
VII-W2.	Pruebas y validación del sistema	46
VII-W3.	Análisis de errores y calibración	46
VII-W4.	Consideraciones finales	46

VIII. Resultados	47
VIII-A. Validación de la etapa de potencia y control de fase	47
VIII-A1. Señal senoidal y rectificada	47
VIII-A2. Respuesta cerca del umbral de 10V	47
VIII-A3. Pulso de disparo al 50 %	49
VIII-B. Integración y verificación del ensamble físico	50
VIII-B1. Conexiones físicas	50
VIII-B2. Conexión de fuente simétrica para pruebas	51
VIII-B3. Placas de rectificador y microcontroladores	51
VIII-C. Validación del flujo de datos y sincronización de sistemas	52
VIII-C1. Comunicación entre Arduinos	52
VIII-C2. Comunicación entre Arduino-Matlab	52
VIII-C3. Curva de Caracterización del sistema térmico	56
VIII-D. Validación de análisis térmico del gabinete metálico	58
VIII-D1. Simulación de transferencia de calor por convección forzada	58
IX. Cronograma	60
X. Presupuesto	61
XI. Conclusiones	62
XII. Recomendaciones	62
REFERENCIAS	63
Anexo A: Pruebas del circuito	67
Anexo B: Programación	70
B-A. Programación Arduino NANO	70
B-B. Programación Arduino UNO	73
Anexo C: Estructura diseñada en SolidWorks	73

ÍNDICE DE FIGURAS

1.	Sistema de lazo cerrado [23].	5
2.	Sistema de lazo abierto [23].	5
3.	Sensores y transductores [23].	7
4.	Sensor de resistencia térmica PT100	8
5.	Termistor PTC	8
6.	Sensor de estado sólido LM35	9
7.	Sensor Termocupla Tipo K [28].	9
8.	Sensor Termocupla tipo J	10
9.	Sensor Termocupla tipo T	10
10.	Módulo MAX6675 y termocupla tipo K [28].	10
11.	OPAMP CN741 [28].	11
12.	Amplificador operacional comparador [28].	12
13.	Duty cycle [28].	13
14.	Optoacoplador PC817 [30].	14
15.	MOC3041 [31].	14
16.	Arduino UNO [37].	15
17.	Arduino NANO [39].	16
18.	Software MatLab [40].	16
19.	Software SolidWorks [41].	17
20.	Ventilador Metálico [42].	18
21.	Gabinete Industrial [43].	18
22.	Dureza del acero [45].	19
23.	Resistencia del acero [46].	19
24.	Maleabilidad del acero [47].	19
25.	Tenacidad del acero [48].	20
26.	Ductilidad del acero [49].	20
27.	Elasticidad del acero [50].	20
28.	Soldabilidad del acero [51].	21
29.	Acero al carbono [53].	21
30.	Acero laminado en frío [55].	22
31.	Transferencia de calor por conducción [57].	22
32.	Transferencia de calor por radiación [59].	23
33.	Laminas de policarbonato [65].	25
34.	Resistencia del policarbonato [65].	25
35.	Policarbonato de techado [64].	26
36.	Diagrama de flujo de planta de temperatura, Elaborado por autores	27
37.	Rectificador media onda controlado monofásico, con cruce por cero y aislamiento [36].	28
38.	Sistema de control digital, Elaborado por autores	29
39.	Sistema de control analógico, Elaborado por autores	30
40.	Sistema de control analógico y digital, Elaborados por autores	31
41.	Módulo max6675 con arduino, Elaborado por autores	31
42.	Pruebas de lectura de temperatura con termocupla tipo K	32
43.	Plataforma EasyEDA [23].	32
44.	Circuito Rectificador EasyEDA, Elaborado por autores	33
45.	Circuito EasyEDA generación PWM y lectura de pines analógicos y digitales, Elaborado por autores	34
46.	Circuito final EasyEDA, Elaborado por autores	35
47.	Diseño PCB circuito rectificador, Elaborado por autores	35
48.	Diseño PCB circuito rectificador, Elaborado por autores	36
49.	Boceto de chasis, Elaborado por autores	36

50.	Diseño de estructura de planta en SolidWorks, Elaborado por autores	37
51.	Selección del material del gabinete	37
52.	Selección del material de pared frontal, lateral y bases de protección de componentes	38
53.	Placa de microcontrolador, Elaborado por autores	41
54.	Placa de rectificador de media onda, Elaborado por autores	43
55.	Diseño final en diseñado en SolidWorks, Elaborado por autores	44
56.	Estructura intera diseñado en SolidWorks, Elaborado por autores	44
57.	Señal senoidal de entrada AC con señal rectificada controlada, Elaborado por autores	47
58.	Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios para el apagado total de la carga, Elaborado por autores	48
59.	Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios con carga, Elaborado por autores	48
60.	Respuesta del sistema a 10 voltios para el apagado total de la carga, Elaborado por autores	49
61.	Respuesta del sistema para el 100% de la carga, Elaborado por autores	49
62.	Pulso de disparo controlado al 50% , Elaborado por autores	50
63.	Conexión de placa de rectificador de media onda con fuente simétrica para pruebas, Elaborado por autores	50
64.	Pueba de conexión de placa de rectificador de media onda con fuente simétrica, Elaborado por autores	51
65.	Placa de microcontrolador, Elaborado por autores	51
66.	Placa de rectificador de media onda, Elaborado por autores	51
67.	Lectura de temperatura mínima, Elaborado por autores	52
68.	Diagrama de comunicación de Arduino NANO, elaborado por autores	53
69.	Diagrama de comunicación con MatLab, elaborado por autores	53
70.	Muestras del sistema, Elaborado por autores	54
71.	Identificación de la planta, Elaborado por autores	54
72.	Cálculo de valores Kp y Ki, Elaborado por autores	54
73.	Curva obtenida por PI, Elaborado por autores	55
74.	Diagrama de comunicación de Arduino UNO, elaborado por autores	55
75.	Curva de caracterización del sistema térmico, elaborado por autores	56
76.	Curva de Actuación, elaborado por autores	56
77.	Inicio de análisis térmico	58
78.	Tabla de cargas térmicas	59
79.	Análisis térmico: rango de 25°C a 80°C	59
80.	Pruebas iniciales del circuito, Elaborado por autores	67
81.	Señal senoidal de entrada AC con señal rectificada controlada, Elaborado por autores	67
82.	Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios para el apagado total de la carga, Elaborado por autores	68
83.	Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios con carga, Elaborado por autores	68
84.	Pulso de disparo controlado al 50% , Elaborado por autores	68
85.	Conexiones físicas del circuito, Elaborado por autores	69
86.	Placa de rectificador de media onda, Elaborado por autores	69
87.	Placa de microcontrolador, Elaborado por autores	70
88.	Prueba de conexión general de circuito, Elaborado por autores	70
89.	Programación arduino Nano con lectura de termocupla sin rectificador, Elaborado por autores	71
90.	Lectura termocupla con circuito rectificador y pwm de 30 grados a 150 grados, Elaborado por autores	71
91.	Lectura de temperatura mínima, Elaborado por autores	72
92.	Lectura de temperatura mínima, Elaborado por autores	72
93.	Lectura de pines analógicos y generación de PWM, Elaborado por autores	73
94.	Diseño final en diseñado en SolidWorks, Elaborado por autores	73
95.	Estructura intera diseñado en SolidWorks, Elaborado por autores	74

ÍNDICE DE TABLAS

I.	Propiedades térmicas y límites de temperatura	23
II.	Propiedades mecánicas en estado recocido	24
III.	Propiedades físicas generales del acero	24
IV.	Propiedades térmicas del policarbonato	26
V.	Datos de Modelado: Temperatura, PWM y Voltaje de Salida (30 °C – 150 °C)	57
VI.	Tabla de actividades realizadas	60
VII.	Tabla de presupuesto	61

II. INTRODUCCIÓN

En el ámbito de la formación en ingeniería, se observa con frecuencia que el aprendizaje de los sistemas de control se desarrolla en un plano puramente teórico, donde el estudiante interactúa principalmente con modelos matemáticos y simulaciones computacionales. Si bien estas herramientas son fundamentales, carecen de la capacidad de transmitir la complejidad intrínseca de los procesos físicos reales, tales como la inercia térmica, las perturbaciones del entorno y el comportamiento no lineal de los actuadores de potencia [1].

Esta desconexión entre el aula y la planta industrial genera una brecha en el desarrollo de criterios técnicos, limitando la capacidad de los futuros profesionales para enfrentarse a problemas tangibles donde el error no es solo una cifra en pantalla, sino un evento físico con consecuencias materiales [2].

El presente proyecto se fundamenta en la creación de una planta didáctica de control de temperatura diseñada específicamente para ser el puente entre estos dos mundos. El objetivo principal es ofrecer una herramienta donde el usuario pueda "sentir" la respuesta del sistema, experimentando de primera mano cómo una decisión en el algoritmo se traduce en un cambio térmico real. Para lograr esta versatilidad, la planta integra múltiples interfaces de conexión que permiten el uso tanto de controladores industriales tradicionales como de sistemas embebidos de bajo costo, representados por la plataforma Arduino [3].

Esta flexibilidad no solo democratiza el acceso a tecnología de alta precisión, sino que permite al estudiante comparar diferentes arquitecturas de control en un mismo entorno, fomentando un pensamiento crítico sobre la eficiencia y el costo de las soluciones tecnológicas en la industria actual [4].

Más allá de la electrónica de control, el proyecto ha sido concebido como un sistema integral que garantiza una experiencia de usuario segura y profesional. Esto incluye un diseño mecánico meticuloso, donde la estructura no solo cumple una función estética, sino que actúa como un entorno de protección y gestión térmica activa. Mediante simulaciones de flujo de aire y resistencia de materiales, se ha logrado confinar la potencia eléctrica en un gabinete robusto que protege la integridad de los componentes y, sobre todo, la seguridad del estudiante.

Al integrar aspectos de diseño industrial, electrónica de potencia y software de control, se busca entregar una solución completa que transforme la educación técnica, permitiendo que el conocimiento deje de ser un concepto estático para convertirse en una competencia viva y aplicable a las demandas del sector moderno [5].

III. PROBLEMA

A nivel mundial, un alto porcentaje de universidades enfrentan limitaciones significativas en equipamientos de laboratorios especializados para la enseñanza de sistemas de control, especialmente en países en vías de desarrollo [6]. El informe de una empresa europea reportó que solo el 7 % del 10 % de instituciones de educación secundaria superior técnica (equivalente a colegios técnicos) tienen laboratorios considerados “no adecuados” o “insuficientes para prácticas modernas”. En América Latina, aproximadamente el 45 % de los países reportan una carencia de infraestructuras educativas adecuadas que permitan a los estudiantes interactuar con módulos didácticos modernos y funcionales para el aprendizaje de control automático [7].

Un entorno académico que no cuente con los equipamientos adecuados para realizar prácticas de laboratorio repercute en el aprendizaje de los estudiantes, limitando su capacidad de aplicar criterios técnicos para la solución de problemas de control típicos de un sistema de primer orden [8]. Esta restricción se vuelve evidente en procesos como el control de temperatura, una variable térmica ampliamente utilizada en la industria, intervienen comportamientos técnicos que los estudiantes deben aprender a identificar y manejar; uno de ellos es el margen de error de los sensores [9]. Los sensores de temperatura como termistores, termopares o sensores digitales presentan un margen de error que puede variar dependiendo del modelo, las condiciones ambientales, el tiempo de respuesta y el método de calibración. Esta imprecisión, aunque aparentemente mínima, puede afectar de forma significativa la calidad del control cuando se requiere una respuesta precisa del sistema. En entornos reales, comprender y compensar este tipo de fenómeno técnico es fundamental para lograr una regulación eficiente [10]. Otro comportamiento relevante es la histéresis, presente en muchos sistemas térmicos debido a la inercia del proceso [11]. Esta se manifiesta cuando la temperatura medida no sigue inmediatamente los cambios en la señal de control, provocando un retardo o una diferencia entre el valor de activación y desactivación de un actuador térmico; además, puede inducir oscilaciones, sobre impulsos o tiempos de estabilización prolongados, lo que debe ser cuidadosamente analizado en el diseño y ajuste de un sistema de controlador [12].

También, otro problema considerable en los sistemas educativos es la falta de interacción entre plataformas de sistemas embebidos y dispositivos enfocados en entornos industriales. Debido a esta desconexión, es complicado para los estudiantes poder experimentar la comunicación de dispositivos entre sí, lo que dificulta la comprensión sobre el funcionamiento de procesos automatizados. Es por ello la falta de práctica de estos en el entorno profesional, donde es común encontrar este tipo de problemáticas. Entonces, al introducir este tipo de conexiones en el contexto del aprendizaje ayudaría a fortalecer al estudiante a formarse ante las exigencias de la industria [8].

Por todo lo expuesto, la educación enfrenta desafíos significativos y una gran parte de la población no tiene acceso a la misma, lo que muestra una necesidad urgente de implementar herramientas educativas útiles que permitan al estudiante, además de experimentar con fenómenos técnicos reales como el error de medición, el retardo de respuesta, entre otros, busque establecer una conexión dentro de un sistema accesible que simule condiciones similares a las de un entorno industrial [13]. En este contexto, la propuesta busca ofrecer una solución práctica y accesible que permita reducir la brecha entre la teoría y la práctica, fortaleciendo un aprendizaje técnico, aplicado y contextualizado en los estudiantes de ingeniería [14].

IV. JUSTIFICACIÓN

El acceso a laboratorios con equipamiento favorece la aplicación práctica de conocimientos adquiridos, un módulo didáctico no solo fortalecerá la formación técnica de los estudiantes, sino que también fomentará un aprendizaje activo, permitiendo que los alumnos participen directamente en el proceso de diseño, implementación, calibración y evaluación del sistema. [8].

Varios estudios proponen soluciones de bajo costo y código abierto como alternativas viables para democratizar el acceso a la educación práctica en control automático. Por ejemplo, Thedsakhulwong y Hernmek [15] diseñaron un controlador PID de temperatura usando Arduino Uno R3 con excelentes resultados de estabilidad térmica a bajo costo, demostrando que es posible proponer sistemas funcionales de bajo presupuesto. Además, su diseño flexible permitirá su adaptación en entornos físicos, favoreciendo su uso en clases presenciales y en prácticas remotas [16]. Un controlador PID es primordial en los sistemas de control automatizado ya que permite mantener una variable dentro de los rangos de control permitidos por el proyecto, realizando correcciones si llegase a existir desviaciones con respecto al valor contemplado. También, al ser enfocado en entornos industriales, su aplicación llega a ser común, debido a que mejora la calidad de dichos procesos aumentando la confiabilidad del sistema. Es por ello que aprender a como utilizar y ejecutar un PID ayuda a comprender y poder optimizar sistemas automatizados [10].

Frente a esto, el desarrollo de un proceso didáctico de bajo costo para el control de temperatura utilizando un regulador proporcional, integral y derivativo (PID) surge como una alternativa concreta y necesaria [17]. Esta planta se presenta como un recurso educativo que, sin requerir grandes inversiones, permitirá a los estudiantes interactuar con un sistema de primer orden real, observar el comportamiento de la variable controlada y comprender de forma tangible los efectos de los distintos parámetros del controlador [18][19].

El proceso propuesto no solo fortalecerá la formación técnica de los estudiantes, sino que también fomentará un aprendizaje activo, permitiendo que los alumnos participen directamente en el proceso de diseño, implementación, calibración y evaluación del sistema [20]. Con la posibilidad de integrar un proceso con comunicaciones con controladores industriales como PLCs, junto con programas de sistemas embebidos como Arduino. Esto accedería a una conexión que permita la integración del proyecto a entornos automatizados, haciendo que su uso sea frecuente en los laboratorios prácticos. Esta integración permitiría un monitoreo de datos desde interfaces externas como MATLAB, reforzando herramientas necesarias en el contexto académico.

En síntesis, el proyecto se orienta superar la limitación estructural en el acceso a módulos didácticos de control automático, al proponer una solución funcional, pedagógica y económicamente viable, adaptable a diferentes contextos educativos [21]. Su implementación contribuirá significativamente al fortalecimiento de los laboratorios académicos y al cierre de la brecha existente entre teoría y práctica, facilitando una formación más integral y alineada con los requerimientos actuales de la industria 4.0. Además, el desarrollo de este tipo de herramientas educativas ha demostrado mejorar el rendimiento y la motivación estudiantil en cursos de automatización y control [22].

V. OBJETIVOS

V-A. *Objetivo general*

Desarrollar una planta de control de temperatura con interfaces de conectividad industrial y embebida, permitiendo la prueba comparativa de distintos algoritmos de control.

V-B. *Objetivos específicos*

- Diseñar un sistema de control de temperatura basado en la arquitectura de un regulador PID que permita el ajuste de los parámetros de control.
- Desarrollar un sistema para la captación y transmisión de señales digitales y analógicas, que facilite la integración de la planta con plataformas externas, mediante puertos de comunicación.
- Evaluar el desempeño del sistema implementado mediante la medición de variables como el tiempo de respuesta, sobre impulso y error en estado estable frente a diferentes condiciones de operación.

VI. MARCO TEÓRICO

VI-A. Sistemas de control

Los sistemas de control están conformados por una serie de elementos que pueden ser mecánicos, eléctricos, electrónicos, que actúan de manera conjunta para satisfacer un objetivo. Estos elementos se encuentran bajo un sistema de relaciones que les permite compartir información entre sí, es decir que un cambio en uno de ellos, puede influir en la salida de los demás.

VI-A1. Principio de realimentación: Este fenómeno es considerado a la devolución de la señal de la salida a la entrada de un sistema, con el propósito de comparar su comportamiento. Es un mecanismo que parte del sistema de control y es fundamental para sistemas en los que se tiene variables que cambian de estado constantemente, permitiendo comparar el resultado obtenido con el resultado que deseamos para poder hacer los ajustes necesarios y aumentar su precisión.

VI-A2. Sistema de control lazo cerrado: Los sistemas de control lazo cerrado son comúnmente utilizados en procesos industriales para el control de procesos automatizados. Este tipo de sistema utiliza una señal de retroalimentación para comparar el resultado final con el resultado deseado, conocido con la nomenclatura de "set point," el cual será un valor que pueda ser configurado por el operador.

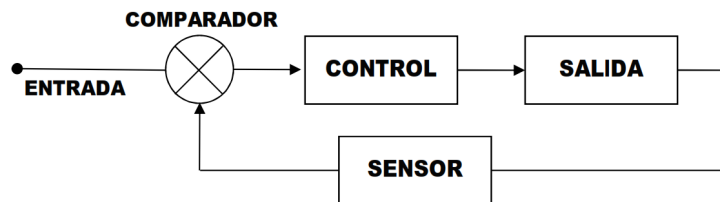


Figura 1. Sistema de lazo cerrado [23].

VI-A3. Sistema de control lazo abierto: Los sistemas de control de lazo abierto no mantiene la señal de retroalimentación, por lo que no son tan precisos como los sistemas de lazo cerrado, estos sistemas solo son utilizados en procesos que la respuesta de salida no requiera un mayor control de su precisión.

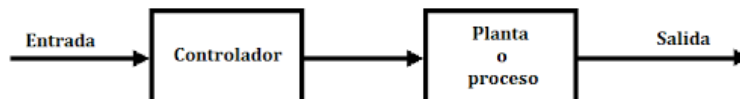


Figura 2. Sistema de lazo abierto [23].

VI-A4. Sistemas de control de temperatura: Un sistema de control de temperatura es un conjunto de elementos que permiten medir y calibrar la temperatura de una planta física a un valor deseado. Estos sistemas pueden describirse por medio de ecuaciones diferenciales basadas en la ley de enfriamiento de Newton y balances de energía.

VI-A5. Sistema de primer orden: El comportamiento dinámico de un sistema térmico simple puede aproximarse mediante un modelo de primer orden, expresado como:

$$G(s) = \frac{K}{\tau s + 1} \quad (1)$$

donde:

- K : ganancia estática del sistema ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$)
- τ : constante de tiempo térmica del proceso

Este modelo es común en sistemas con un solo elemento calefactor y un sensor ubicado cerca de la fuente térmica.

VI-B. Controladores PID y algoritmos de control

VI-B1. Algoritmos de control: Los algoritmos de control son métodos matemáticos que permiten controlar la señal de control, para que actúen sobre la planta de la manera deseada.

VI-B2. Control proporcional: El control proporcional es una de las estrategias más básicas en el control automático, es una estrategia en la que la respuesta de salida es proporcional a la diferencia entre un valor actual y uno deseado de una variable del proceso, es decir que mientras mayor sea la diferencia entre estas dos señales, mayor será la señal de control generada para corregir este desfase[24].

$$u(t) = K_p e(t) \quad (2)$$

$$\frac{U(s)}{E(s)} = K_p \quad (3)$$

donde:

- $e(t)$ = error
- $u(t)$ = salida del controlador
- K_p = constante de ganancia proporcional

VI-B3. Control proporcional integral: El controlador proporcional integral tiene la capacidad de mejorar la precisión en los procesos automatizados sin aumentar la complejidad del sistema. Este combina un control proporcional con una acción integral que acumula la señal de error para forzarla a desaparecer en un estado estacionario. El PI introduce un polo en el origen y un cero finito para la compensación del integrador logrando una estabilidad y un mejor tiempo de respuesta.

$$K(s) = k_p + \frac{k_i}{s} = \frac{k_p \left(s + \frac{k_i}{k_p} \right)}{s} \quad (4)$$

VI-B4. Control proporcional integral derivativo: Un control proporcional integral derivativo es un instrumento que recibe datos de entrada de sensores, calcula el error como la diferencia entre el valor real y el deseado para poder regular la señal de salida como temperatura. Para implementarse en microcontroladores, el controlador PID debe discretizarse. Una discretización común es mediante el método de Euler:

$$u[k] = K_p e[k] + K_i T_s \sum_{i=0}^k e[i] + K_d \frac{e[k] - e[k-1]}{T_s} \quad (5)$$

donde:

- T_s = periodo de muestreo
- $e[k]$ = error en el instante k

VI-B5. *Sensores y transductores:* Los sensores y transductores son dispositivos que son capaces de detectar los cambios constantes en el ambiente, y responde con una salida en otro sistema. Convierte las magnitudes físicas en valores analógicos que llegan a ser medibles luego de un procesamiento de la señal. Cuentan con una serie de características que permiten evaluar su desempeño, precisión y exactitud en un sistema.



Figura 3. Sensores y transductores [23].

VI-B6. *Error:* El error quiere decir la diferencia entre el valor teórico y el valor medido por el sensor, el reducir este error es una pieza clave para mejorar la precisión en sistemas que requieran una respuesta rápida en control.

VI-B7. *Exactitud:* La exactitud es el porcentaje de la medición del valor entregado por el sensor con el valor real, se especifica en términos de precisión en una escala de lectura.

VI-B8. *Sensibilidad:* La sensibilidad indica cuanto cambia el valor de salida del sensor por cada unidad de cambio en su entrada, en sistemas con aplicaciones de señales dinámicas, un sensor de alta sensibilidad es importante para detectar cambios mínimos que se perderían fácilmente en el ruido.

VI-B9. *Error por no linealidad:* La no linealidad en los sensores hace referencia a la desviación máxima de la salida tomando respecto a una línea ideal, esta no linealidad puede llegar a afectar la precisión en sistemas con fines lineales.

VI-B10. *Error por histéresis:* La histéresis es la diferencia máxima en los diferentes valores medidos por el sensor para una misma entrada, dependiendo si se aproxima al punto, mediante un incremento o disminución.

VI-B11. *Estabilidad:* La estabilidad en un sensor es la capacidad de mantener un valor constante en la salida, con una entrada fija a lo largo del tiempo, y regresar a un estado de equilibrio tras ser sometido a una operación.

VI-B12. *Resolución:* Es el cambio mínimo en la entrada que puede llegar a ser detectado por el sensor en su salida, es clave para poder escoger el sensor o transductor dependiendo su aplicación.

VI-C. *Adquisición de señal*

VI-C1. *Adquisición de señal:* El proceso de adquisición en sensores es el proceso de capturar y convertir señales físicas en datos digitales para su análisis y almacenamiento, requiere de circuitos de acondicionamiento que permitan convertir señales pequeñas en valores que puedan ser interpretados correctamente por el dispositivo de control. Las termocuplas son sensores basados en el efecto Seebeck estableciendo que Cuando dos metales distintos se unen y existe una diferencia de temperatura entre los extremos, se genera un voltaje proporcional. Esto permite calcular la temperatura a partir de un valor de voltaje generado.

VI-C2. *Análisis y comparativa de sensores de temperatura:* En el diseño de la planta, la elección del sensor de temperatura es el primer y el paso más importante; nuestro objetivo es tener una lectura correcta de datos, si el

sensor llega a dar datos erróneos el algoritmo fallará sin importar la programación. La medición no solo busca leer la temperatura, si no la repetitividad y la resistencia del sensor ante el ambiente de trabajo [25].

- Sensores de resistencia térmica (RTD - PT100): Este sensor es considerado fundamental para el estándar de precisión en laboratorios. Se consideran muy estables pero tienen un problema y es que sufren de auto calentamiento, donde la corriente necesaria para medirlos genera un calor propio que da una falsa lectura. Además, al realizar alguna manipulación con el sensor podría romper el filamento cerámico interno, haciéndolo un equipo caro y frágil para la planta [26].



Figura 4. Sensor de resistencia térmica PT100

- Termistores (PTC): Este sensor es considerado como un sensor de respuesta rápida, pero su comportamiento no es lineal. Esto quiere decir que la resistencia y la temperatura siguen una curva logarítmica. Para un sistema embebido que se está implementando esto mandará al estudiante a realizar cálculos complejos de forma constante para corregir la temperatura y esto generaría un atraso en el muestreo de control.



Figura 5. Termistor PTC

- Sensores de Estado Sólido (LM35): Este sensor entrega una señal digital o de voltaje ya lista, pero su rango varía. Estos, al estar encapsulados, tienen un rango bajo de condiciones térmicas, quiere decir, que si

la temperatura supera los 150°C, los sensores dejarían de funcionar por completo [27].

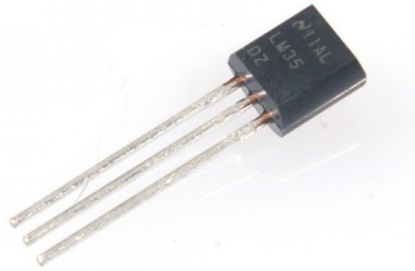


Figura 6. Sensor de estado sólido LM35

- Sensor Termocupla Tipo K: La termocupla tipo K es un sensor de temperatura ampliamente utilizado en aplicaciones industriales debido a su amplio rango de medición, que puede oscilar aproximadamente entre -200 °C y 1350 °C. Este sensor está compuesto por dos metales distintos, cromo y aluminio, que generan una diferencia de potencial cuando se someten a variaciones térmicas, produciendo una señal en milivoltios proporcional a la temperatura. Su robustez, rapidez de respuesta y bajo costo lo convierten en una opción confiable para sistemas de control y monitoreo. Sin embargo, debido a la baja amplitud de su señal, es necesario utilizar un módulo transmisor MAX6675 para su adecuado procesamiento.[28].

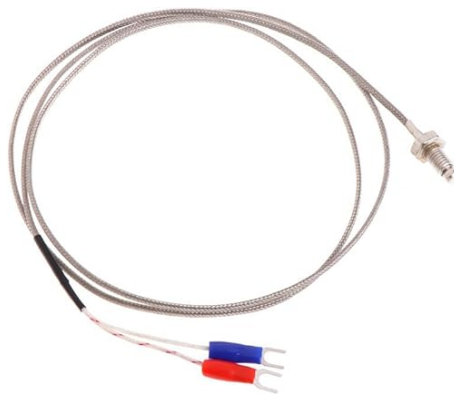


Figura 7. Sensor Termocupla Tipo K [28].

- Sensor Termocupla tipo J: Es un sensor muy utilizado, su rango va desde los 0°C hasta los 750°C. Aunque su precio es bajo, su problema es la oxidación. El hilo del hierro se desgasta rápidamente en ambientes con humedad alta o cuando hay un flujo de aire constante, en este caso el ventilado que estará dentro de la planta. Si el hierro se oxida la lectura de la temperatura que lanzara el sensor serán datos falsos, lo que arruinaría la medición que se necesita realizar [27].



Figura 8. Sensor Termocupla tipo J

- Sensor Termocupla tipo T: Este sensor es conocido por la estabilidad en temperaturas bajo cero y rangos moderados que manda. Su límite superior va entre los 350°C a 400°C. Aunque la planta no llegara hasta ese tipo de temperturas elevadas, trabajara con limites similares que reducirian la vida util del sensor.



Figura 9. Sensor Termocupla tipo T

VI-C3. Módulo MAX6675: El módulo transmisor MAX6675 permite la conexión de una termocupla tipo K para la medición de temperatura, este incorpora también la compensación de junta fría para una mayor precisión. Cuenta con un convertidor analógico-digital interno, con resolución de 12 bits en un rango de 0 °C hasta 1023 °C. Tiene una interfaz de comunicación digital SPI lo que le permite su conectividad con microcontroladores como Arduino, PIC, entre otros.



Figura 10. Módulo MAX6675 y termocupla tipo K [28].

VI-D. Acondicionamiento de señal

VI-D1. Acondicionamiento de señal: El acondicionamiento de señales es primordial para procesar y analizar señales generadas por sensores, que en su mayoría suelen ser muy tenues o ruidosas. En esta etapa se transforma las señales de manera que la información pueda ser procesada y adaptable para el sistema de control, garantizando la veracidad de los datos obtenidos. El acondicionamiento se divide en 3 procesos que permiten adaptar la señal para que sea útil en un sistema mecatrónico.

- Implementar medidas de protección para evitar sobrecargas en elementos sensibles.
- Ajustar nivel de señal, amplificar o disminuir para que pueda ser interpretada en su procesamiento.
- Aplicar filtros para reducir el ruido y poder obtener señales limpias y confiables.

VI-D2. Amplificación: Un amplificador operacional es un dispositivo de alta ganancia acoplado en corriente continua, que puede aumentar la magnitud de una señal sin alterar su forma, por medio de su realimentación pueden configurarse según sea su aplicación, es decir filtrado, integración, comparación y acondicionamiento de señales.

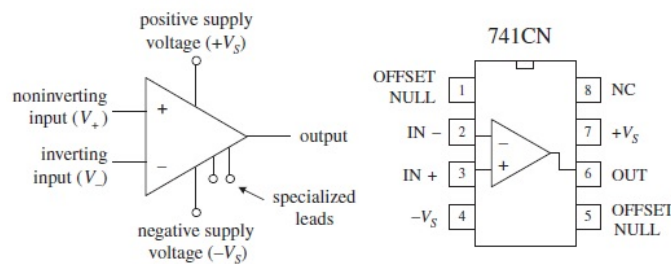


Figura 11. OPAMP CN741 [28].

VI-D3. Amplificador inversor: El amplificador inversor es una de las configuraciones de amplificador operacional, invierte la señal de la fase hasta 180° entre la señal de entrada y salida, puede amplificar su amplitud mediante resistencias en el circuito. La ganancia del voltaje se calcula mediante la relación de la resistencia de retroalimentación y la resistencia de entrada, su expresión matemática es:

$$\frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = -\frac{R_2}{R_1} \quad (6)$$

VI-D4. Amplificador no inversor: El amplificador no inversor mantiene la misma fase que la señal de entrada, es decir que no hay inversión en este caso. La ganancia en esta configuración siempre será positiva y se determina a partir de la relación de las resistencias conectadas en el circuito, un divisor en el pin inversor mientras que en el pin no inversor se le conecta la señal de entrada.

$$\frac{V_{\text{salida}}}{V_{\text{entrada}}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1} \quad (7)$$

VI-D5. Amplificador comparador: El amplificador comparador es comúnmente usado para comparar dos niveles de voltaje y generar una señal de salida dependiendo cual de los dos sea mayor, esta configuración opera sin realimentación en lazo abierto y trabaja en saturación, es decir que mientras uno de los dos voltajes conectados a los pines inversor - no inversor, la salida del comparador satura al nivel más alto.

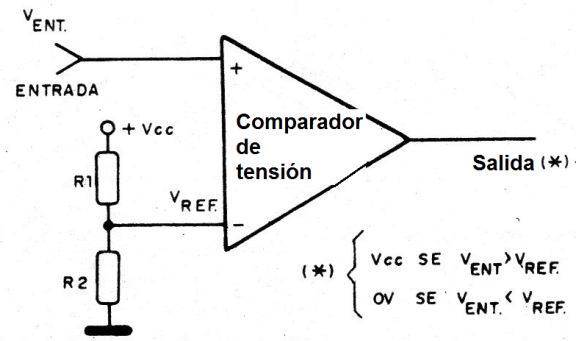


Figura 12. Amplificador operacional comparador [28].

VI-D6. *Filtrado*: La sección de filtrado está enfocada en la reducción de ruido y componentes no deseados en la señal, esto es fundamental en sistemas que adquieran señales de sensores porque se necesita un control preciso, estos se pueden implementar en el dominio digital, analógico y los más comunes son, filtros paso-bajo, pasa-alto y pasa-banda.

La atenuación en un filtro es medida en decibelios, indica el porcentaje de reducción de la potencia en una señal fuera de la banda de paso, mientras que la frecuencia de corte es el punto en el que se define el máximo y mínimo entre las frecuencias que el filtro dará paso. Los filtros pasivos están conformados por elementos como resistencias y capacitores, los filtros activos tienen amplificadores operacionales para un mayor control.

VI-D7. *Filtro Paso-bajo*: El filtro paso bajo es un circuito electrónico diseñado para permitir el paso a las frecuencias más bajas, mientras que se opone a las más altas.

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{f}{f_c}\right)^2}} \quad (8)$$

donde:

- V_{in} es el voltaje de entrada,
- V_{out} es el voltaje de salida,
- f es la frecuencia de la señal de entrada,
- f_c es la frecuencia de corte calculada.

VI-D8. *Filtro Paso-alto*: El filtro paso alto es un circuito que da paso a las frecuencias superiores a una frecuencia de corte, mientras que atenúa las de menor valor.

$$V_{out} = V_{in} \times \frac{\omega RC}{\sqrt{1 + (\omega RC)^2}} \quad (9)$$

donde:

- V_{in} es el voltaje de entrada
- ω es la frecuencia angular
- R es la resistencia
- C es la capacitancia
- f es la frecuencia de entrada

VI-D9. Modulación PWM: La modulación por ancho de pulso es una técnica fundamental en la electrónica utilizada para el control de la cantidad de energía que se entrega a una carga, sin tener que variar el voltaje de la fuente a utilizar. Mantiene una constante amplitud de la señal, se ajusta la relación entre el tiempo activo y el Duty cycle, permitiendo modificar la potencia promedio proporcionada a la carga.

VI-D10. Duty cycle: El duty cycle o el ciclo de trabajo, es el porcentaje de tiempo en el que la señal está en un nivel activo dentro de un periodo determinado, permite un control preciso de la potencia sin sufrir pérdidas de energía, Un ciclo de trabajo al 90 % quiere decir que está la mayor parte del tiempo encendido y recibiendo el máximo voltaje, mientras que en un ciclo de 10 % estaría casi apagado.

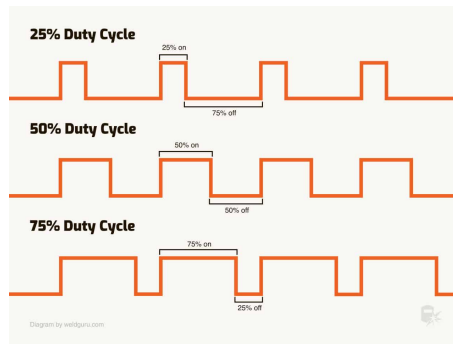


Figura 13. Duty cycle [28].

Para que una termocupla pueda ser leída por un microcontrolador se utiliza un amplificador operacional AD620 para aumentar señales diferenciales de muy baja amplitud, manteniendo alta precisión y bajo nivel de ruido. Su ganancia puede ajustarse mediante una única resistencia externa, lo que facilita su integración en sistemas de medición. Este módulo es comúnmente empleado con sensores como termocuplas, celdas de carga o puentes Wheatstone, debido a su elevada relación de rechazo en modo común. Gracias a su bajo voltaje de offset y estabilidad, permite obtener señales amplificadas adecuadas para su procesamiento por microcontroladores [29].

VI-E. Etapa de potencia y control de carga

En un control de potencias alimentado con corriente alterna, como lo son las resistencias térmicas, se realiza por modulación de ancho de pulso (PWM) sincronizado con el cruce por cero. En la figura 36 se observa el esquema de conexiones electrónicas necesarias para poder controlar la carga resistiva por medio de un control de potencias. La potencia entregada se regula disparando un SCR sólo en el semiciclo positivo, esto hace que sea controlable a partir del ángulo de disparo.

VI-E1. Optoacoplador PC817 - MOC3041: El optoacoplador PC817 es un componente que transfiere señales eléctricas entre dos circuitos mediante un acoplamiento óptico, proporcionando aislamiento galvánico. Internamente contiene un diodo emisor de luz (LED) y un fototransistor, separados por una barrera óptica [30]. La conducción en el circuito de salida se produce cuando el diodo emisor de luz se ilumina, activando el fototransistor y permitiendo la conducción. Este proceso elimina la conexión eléctrica directa, protegiendo al microcontrolador de picos de voltaje que podrían dañarlo.

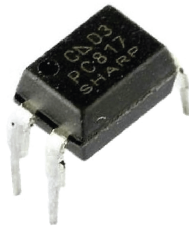


Figura 14. Optoacoplador PC817 [30].

VI-E2. MOC3041: El MOC3041 es un opto-triac driver con detección de cruce por cero, lo que le permite disparar un triac o SCR en el momento exacto en que la señal de corriente alterna pasa por cero voltios. Esto reduce las interferencias electromagnéticas (EMI) y garantiza un encendido controlado [31].



Figura 15. MOC3041 [31].

El PC817 y el MOC3041 se enlazan para asegurar el aislamiento y activación de forma segura de la carga conectada a corriente alterna. El octocoplador PC817 es necesario para aislar la señal que proviene del microcontrolador o de la parte analógica del circuito. Su función principal es: verificar si hay una señal de control, el aislamiento eléctrico del microcontrolador en la sección de potencia por acoplamiento óptico, la activación del fototransistor interno cuando el led interno recibe corriente. Así se evitaría cualquier variación o pico de voltaje que provenga de la carga que el microcontrolador llegue a alcanzar.

Otros octocopladores que realizan un trabajo similar son:

- El PC817 es un optoacoplador compuesto por un diodo LED infrarrojo y un fototransistor NPN encapsulados con una barrera óptica. Cuando el LED es activado, la luz emitida induce la conducción del fototransistor, permitiendo transmitir la señal sin contacto eléctrico directo. Este dispositivo es ampliamente utilizado para aislar microcontroladores y protegerlos frente a ruidos eléctricos, transitorios y picos de voltaje provenientes de las etapas de potencia [32].
- El 4N25 es un optoacoplador de uso general que incorpora un LED infrarrojo y un fototransistor de respuesta moderada. Su arquitectura permite trabajar tanto con señales digitales como analógicas, siendo un componente confiable para el aislamiento de señales, conversión de niveles lógicos y protección de circuitos sensibles. Su durabilidad y simplicidad lo han convertido en un estándar dentro de aplicaciones industriales y educativas [33].

Otros Opto-Triac Drivers (MOC) que realiza un trabajo similar son:

- El MOC3041 es un opto-triac driver con detección de cruce por cero. Esta característica permite que el disparo del triac ocurra únicamente cuando la señal AC cruza los 0 V, lo que reduce interferencias electromagnéticas y proporciona un encendido más estable. Es apropiado para sistemas de control de temperatura, automatización y aplicaciones donde se requiere minimizar ruidos eléctricos [34].

- El MOC3021 es un opto-triac que no incluye detección de cruce por cero, permitiendo el disparo del triac en cualquier punto del ciclo AC. Esto lo hace ideal para el control de fase, como reguladores de luz o variadores de velocidad para motores universales. Mantiene un aislamiento galvánico completo y responde rápidamente a la señal del LED de entrada [35].

El trabajo en conjunto que realizan es que la primera parte de protección es realizada por el PC817, realizando el aislamiento del circuito y la segunda parte de protección es realizada por el MOC3041, que esta se encarga de la conmutación del lado AC. Estos forman un sistema de activación de carga AC que es controlada de manera electrónica, siendo puntual para que los microcontroladores no estén expuestos directamente a tensiones altas.

VI-F. Interfaces de Hardware y Sistemas Embebidos

VI-F1. Interfaces de Hardware: Los sistemas de control requieren una interacción entre los sensores, actuadores y el microcontrolador. Esto se logra a través de interfaces de hardware que permiten el intercambio de información de las señales. En la planta didáctica es gestionado por el microcontrolador Arduino 1 y canales de comunicación.

VI-F2. Arduino: Arduino es una plataforma de hardware y software libre desarrollada para facilitar la creación de proyectos electrónicos interactivos. Fue creada en el año 2005 en Italia por Massimo Banzi y David Cuartielles, con el objetivo de proporcionar una herramienta económica, accesible y de código abierto para estudiantes, docentes y entusiastas de la electrónica [36]. Estas placas están conformadas por un microcontrolador, pines digitales y analógicos, un regulador de voltaje, un puerto USB y un software de programación llamado *Arduino IDE*, donde se utiliza el lenguaje C/C++. La placa Arduino Uno es una de las más utilizadas tanto por principiantes como por profesionales. Está compuesta por un microcontrolador ATmega328P, 14 pines digitales y 6 entradas analógicas.

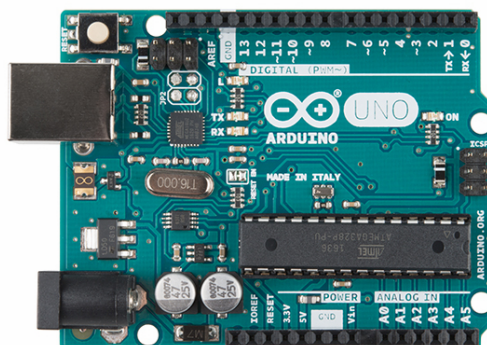


Figura 16. Arduino UNO [37].

La placa Arduino Nano es una versión compacta y versátil basada en el microcontrolador ATmega328P, diseñada especialmente para integrarse en espacios reducidos y protoboards sin perder funcionalidad profesional. Posee 14 pines digitales de entrada/salida, 8 entradas analógicas que superan la capacidad del modelo Uno, y mantiene la misma arquitectura lógica, lo que facilita una transición directa en el desarrollo de sistemas embebidos. [38].

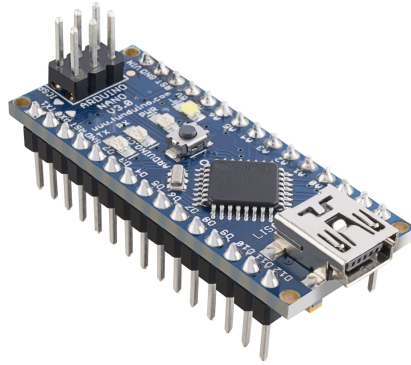


Figura 17. Arduino NANO [39].

VI-F3. Software MATLAB: MATLAB es un entorno de programación y cálculo numérico ampliamente utilizado en ingeniería para el análisis, simulación y procesamiento de datos. Su plataforma integra herramientas para realizar operaciones matriciales, análisis estadístico, diseño de sistemas de control y procesamiento de señales. Además, cuenta con una amplia variedad de toolboxes que permiten desarrollar aplicaciones especializadas de forma eficiente. Su interfaz gráfica y su lenguaje de alto nivel facilitan la modelación y simulación de sistemas complejos, reduciendo el tiempo de implementación [23].

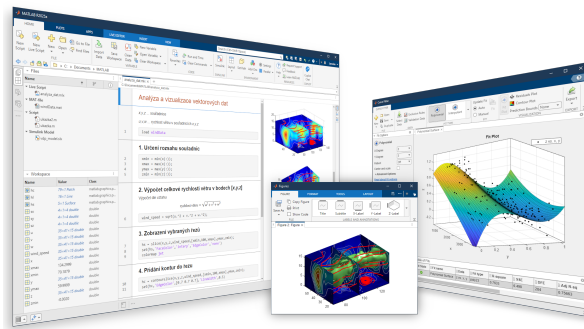


Figura 18. Software MatLab [40].

VI-G. Software SolidWorks

SolidWorks es un software de diseño asistido por computadora (CAD) utilizado para modelado 3D, simulación mecánica y creación de planos técnicos. Este programa permite desarrollar modelos paramétricos, ensamblajes y análisis de esfuerzo mediante métodos de elementos finitos (FEA), lo que facilita el diseño y validación de piezas y mecanismos antes de su fabricación. Su interfaz intuitiva y el uso de herramientas basadas en características (features) permiten modificar modelos de forma rápida, manteniendo la coherencia geométrica del diseño. SolidWorks también incluye módulos especializados para simulación, análisis térmico, diseño de láminas metálicas y fabricación asistida por computadora (CAM). [41].

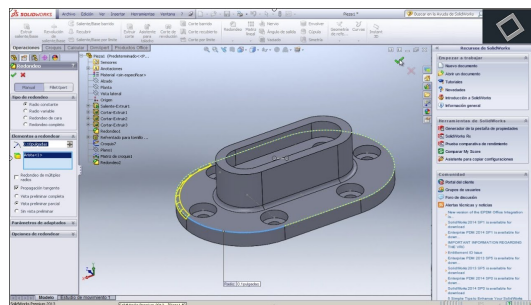


Figura 19. Software SolidWorks [41].

VI-H. Componentes de carga

VI-H1. Elemento calefactor: El elemento calefactor es el encargado de elevar la temperatura del sistema a través de la conversión de energía eléctrica en energía térmica. En la planta se utiliza una resistencia térmica la que por su principio de funcionamiento, se basa en el efecto Joule, donde la corriente que atraviesa el material resistivo produce un calentamiento proporcional I^2R dando paso a un incremento controlado de la variable de temperatura. En la industria podemos encontrar elementos calefactores como:

- Hornos industriales eléctricos: Utilizado en tratamiento térmico de templado y secado de materiales. Las resistencias eléctricas generan temperaturas elevadas lo que permite modificar las propiedades mecánicas de metales.
- Extrusoras: Las resistencias térmicas mantiene el plástico a temperaturas específicas para asegurar su correcta fusión. Las zonas calefactoras se controlan mediante PID que ajustan constantemente la potencia suministrada para evitar fluctuaciones no deseadas.

VI-H2. Actuador de enfriamiento: El actuador de enfriamiento es el encargado de disipar el calor del sistema, disminuye la temperatura de una manera controlada, y evita sobrecalentamientos para mejorar la estabilidad del control. En la industria estos actuadores son fundamentales ya que se trabaja con temperaturas muy altas, como los reactores químicos, máquinas rotativas y circuitos de potencia.

El ventilador metálico de 4 pulgadas a 117Vca es un dispositivo electromecánico utilizado para generar flujo de aire en sistemas de ventilación, enfriamiento y extracción. Su motor de corriente alterna permite un funcionamiento continuo y estable, adecuado para equipos electrónicos, tableros eléctricos y espacios de disipación térmica. Este tipo de ventilador suele estar fabricado en carcasa metálica, lo que incrementa su durabilidad y resistencia a temperaturas elevadas.[42].



Figura 20. Ventilador Metálico [42].

VI-I. Gabinete industrial

Un gabinete industrial es definido como un elemento de protección que está diseñado para almacenar circuitos eléctricos o electrónicos, aislándolos de algún componente o contaminante crítico que pudiesen llegar a generar fallos al circuito que se encuentra adentro. Para este proyecto se ha escogido un gabinete de acero al carbono laminado en frío, cuya fabricación fue hecha mediante un proceso de soldadura MIG, este tipo de soldadura le genera al gabinete una mayor resistencia mecánica. [43].

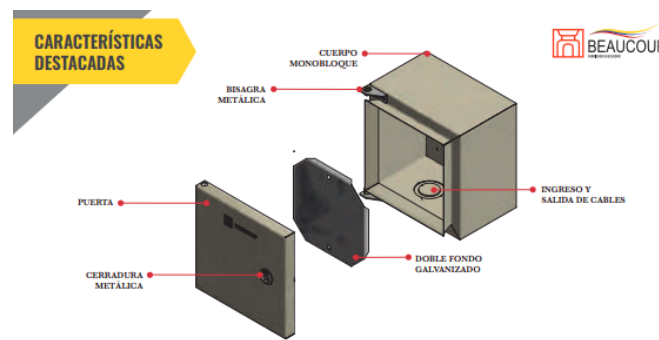


Figura 21. Gabinete Industrial [43].

VI-J. Propiedades del acero

El acero es uno de los materiales más utilizados en la actualidad. Debido a sus propiedades lo hace uno de los materiales esenciales y versátiles para diversos proyectos. El acero es una aleación del hierro y el carbono, no se obtiene de forma natural directamente, si no que el hombre realiza un refinamiento y manipulación de este material para al final obtenerlo como acero. Una aleación es una mezcla de dos o varios elementos cuando uno de ellos es metal, para así obtener un nuevo material. Pero ¿Cuál es la mezcla realmente realizada para obtener el acero?, el hierro es un metal blando y dúctil, cuando se le inyecta carbono (en proporciones pequeñas del 2%) se encaja en los espacios vacíos de la estructura atómica del hierro, haciendo que este material sea mucho más resistente y complicado de realizar una deformación.

Estas son las propiedades:

VI-J1. *Dureza:* En la industria la dureza esta denominada como resistencia mecánica que presenta un material para resistir algún esfuerzo o penetración [44].

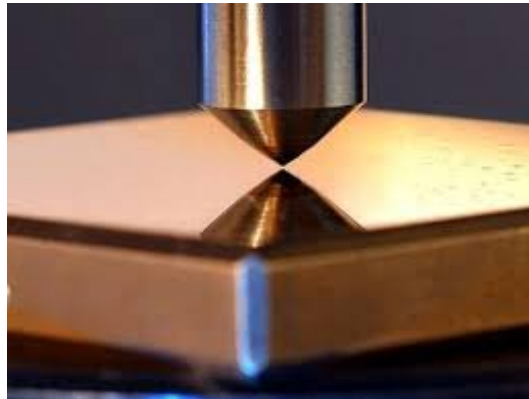


Figura 22. Dureza del acero [45].

VI-J2. *Resistencia:* Lo que hace tan útil al acero es la capacidad de resistirse a un cambio de forma por fuerzas de tracción, compresión o torsión [44].



Figura 23. Resistencia del acero [46].

VI-J3. *Maleabilidad:* La maleabilidad es la capacidad de moldear el acero a nuevas formas debido a la fuerza de compresión sin perder su estructura o que regrese a su forma original, se entiende que, no perderá las características que posee al momento de ser manipulado [44].



Figura 24. Maleabilidad del acero [47].

VI-J4. *Tenacidad:* La tenacidad es la capacidad del metal para absorber energía sin quebrarse, permitiéndole al material soportar impactos repetitivos llegando a la fatiga del material antes de que este presente una falla en su estructura [44].



Figura 25. Tenacidad del acero [48].

VI-J5. *Ductilidad:* La ductilidad es la capacidad que tiene un metal para ser estirado o deformado por medio de fuerzas de tracción sin que este se llegue a romper. Al aplicar fuerza de tracción este se alarga llegando a adelgazarse en dirección a la carga, sin perder su integridad [44].

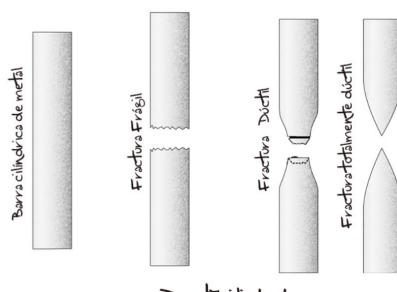


Figura 26. Ductilidad del acero [49].

VI-J6. *Elasticidad:* El acero posee la capacidad de deformarse por medio de ciertas cargas y poder regresar a su estado original cuando estas son eliminadas. Haciéndola útil en diferentes tipos de estructuras que trabaja con fuerzas de tensión en conjunto con compresión de forma constante [44].

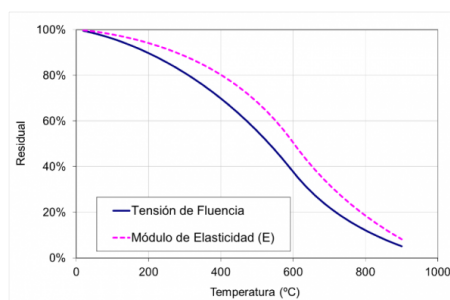


Figura 27. Elasticidad del acero [50].

VI-J7. *Soldabilidad:* La soldabilidad es la propiedad que permite al metal unirse con otro por medio de una soldadura obteniendo un resultado homogéneo. Realizar esta soldadura no afecta al material ni su estructura [44].

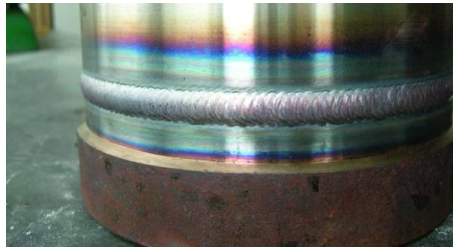


Figura 28. Soldabilidad del acero [51].

VI-K. *Propiedades mecánicas del acero*

Como se mencionó al inicio, el acero es una aleación del hierro y el carbono; Según [52] los contenidos de carbono dentro de la estructura atómica del hierro son superiores al 0.05 % e inferiores al 2.00 % en peso. Estos aceros son conocidos por ser utilizados mayormente para construcción, así es como se los separa de los aceros inoxidables, para herramientas, para usos eléctricos, englobando un sin número de aceros para construcción civil como para mecánica. Dependiendo el porcentaje de carbono del acero al carbono se verían afectados sus propiedades anteriormente mencionadas (Soldabilidad, Elasticidad, Ductilidad, Tenacidad, Maleabilidad, Resistencia y Dureza). Cuan mayor sea el contenido de carbono es acero será más resistente y duro, pero baja en propiedades dúctiles y sostenibles; por otro lado, su microestructura se vería afectada en propiedades de tenacidad y la resistencia de fatiga y desgaste.



Figura 29. Acero al carbono [53].

VI-L. *Definición de Acero laminado en frio*

La laminación en frio del acero parte de haber sumergido la bobina de acero laminado caliente en una solución acida para desoxidarla y eliminar las escamas que se encuentran en la superficie. Luego el acero pasa por unos rodillos que se encuentran a temperatura ambiente y como el material ya no está caliente, los rodillos realizan una fuerza mayor reduciendo el espesor del material. Debido a esa presión ejercida el acero se vuelve duro y quebradizo, y para poder recuperar la ductilidad, se debe calentar el metal de manera controlada y enfriarlo lentamente. Y como acabado se lo vuelve a pasar por los rodillos obteniendo así un espesor deseado. Algunas de las ventajas de laminar en frio el acero es que al quitar el óxido con temperaturas altas, la superficie queda lisa y uniforme, dejando un buen acabado final; el acero al ya estar en temperatura ambiente no tiene contracción térmica, lo que quiere decir es que es posible fabricar un laminado con espesores finos, difíciles de obtener con calor [54].



Figura 30. Acero laminado en frío [55].

VI-M. *Análisis de transferencia de calor en gabinetes industriales*

Un análisis sobre el comportamiento térmico del gabinete industrial es necesario para asegurar la integridad de todo el circuito electrónico. Al ser un gabinete cerrado, la transferencia de energía que hay entre el interior hacia el exterior se guía por los tres puntos de la transferencia de calor, que son: conducción, convección y radiación.

VI-M1. Transferencia de calor por conducción y resistencia del recubrimiento del gabinete: La estructura del gabinete está fabricada bajo la norma JIS 3141, lo que significa que este tiene una alta conductividad térmica, lo que facilita la distribución de calor en el interior del gabinete. El gabinete posee un recubrimiento de pintura en polvo de resinas de poliéster de $65\mu\text{m}$ de espesor; este recubrimiento actúa como una resistencia térmica adicional. En paredes compuestas con capas de resistencia térmica conductiva es mínima, la caída de temperatura también lo será, esto permite que el calor pueda fluir de manera eficiente desde el interior al exterior del gabinete sin que esto pueda llegar a generar gradiente crítico que llegue a perjudicar el circuito electrónico interno [56].

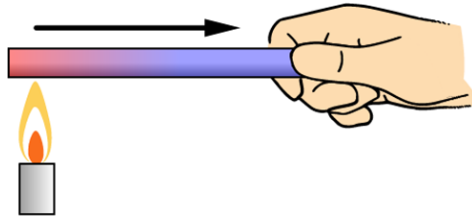


Figura 31. Transferencia de calor por conducción [57].

VI-M2. Influencia de la emisividad en la disipación por radiación: La eficiencia térmica del recubrimiento está determinada por su coeficiente de emisividad, es decir, la capacidad que tiene la superficie para liberar energía hacia el exterior. Aunque la estructura es de acero su comportamiento termino en la parte externa esta conducido por el acabado de la pintura en polvo de poliéster. Debido al espesor tan milimétrico del recubrimiento, la capa de pintura se ve como una resistencia térmica conductiva marginal. Esto quiere decir que el calor es transferido desde el acero hasta la superficie exterior haciendo que la temperatura baje casi nada, permitiendo que la emisividad del poliéster sea convertida en un dominante en dispersarse. Haciendo la comparación del acero “desnudo” de baja emisividad, el recubrimiento texturizado aproxima el sistema al comportamiento de un cuerpo gris, realizando la liberación de calor por radiación. Esta propiedad es necesaria para poder evitar el sobrecalentamiento de los circuitos electrónicos dentro del gabinete, como el Arduino y la etapa de potencia, asegurando así la estabilidad operativa del sistema [58].

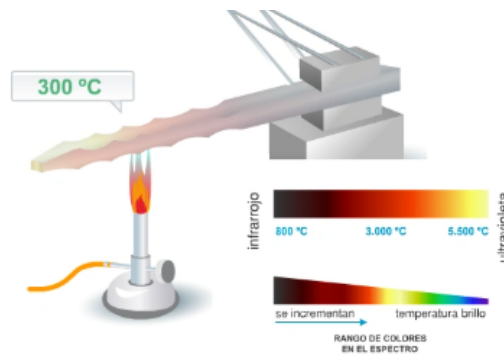


Figura 32. Transferencia de calor por radiación [59].

VI-M3. Irregularidad superficial y convección forzada: El recubrimiento del gabinete es visualmente texturizado, la rugosidad o irregularidad superficial no solo aumenta el área de contacto directo comparándolo con una superficie lisa, sino que también puede inducir medidas de micras en la capa límite. Para la planta, donde se implementará un ventilador, la textura facilitará la transferencia de calor por convección forzada, mejorando el tiempo de respuesta del circuito cuando sea expuesto a perturbaciones térmicas [60].

VI-N. Resistencia del acero al carbono

VI-N1. Resistencia mecánica: El material base del gabinete, acero al carbono laminado en frío, validado bajo la norma JIS 3141, es caracterizado por un proceso de recocido y reducción en frío para alisar su acabado superficial en comparación con el acero trabajado en caliente. Viendo desde la mecánica de los sólidos, el gabinete es evaluado por medio de la Ley de Hooke y el Criterio de Fluencia de Von Mises. El parámetro esencial del módulo de Young ($E = 200 - 210 \text{ Gpa}$), definiendo la rigidez de un material. Este valor permite saber cuál sería la deformación elástica de la estructura con espesor de 0.8mm cuando es sometido al peso de elementos pesados y el doble fondo [61].

VI-N2. Resistencia al calor: El acero al carbono puede llegar a soportar temperaturas normales o moderadas. Pero si se expone a altas temperaturas, puede presentar problemas de oxidación; en comparación con el acero aleado, el acero al carbono tiene limitantes de temperaturas altas, diseñado para aplicaciones de temperaturas elevadas, ya que se vería afectadas sus propiedades mecánicas si estas aplicaciones con calor no son controladas [62].

Tabla I
PROPIEDADES TÉRMICAS Y LÍMITES DE TEMPERATURA

Descripción	Celsius	Fahrenheit	Observaciones
Temp. máxima constante	400°C	752°F	Esencial para temperaturas controlables.
Temp. máxima periodos cortos	500°C	932°F	No exposición a largo plazo.
Oxidación superficial	600°C	1112°F	Riesgo de oxidación a altas temperaturas.
Resistencia al límite elástico	400°C	752°F	Su estructura se debilita.

VI-Ñ. Comparación de propiedades del acero al carbono

VI-Ñ1. *Propiedades mecánicas:* Como se especificó anteriormente, las propiedades del acero al carbono varían dependiendo de la cantidad de carbono y el tratamiento térmico realizado. Los que tengan bajo contenido de carbono presentan ductilidad y soldabilidad, haciéndolos buenos para estructuras. Los aceros con contenido medio de carbono presentan mas resistencia y ductilidad. Los aceros con alto contenido de carbono presentan mayor dureza y ductilidad [63].

Tabla II
PROPIEDADES MECÁNICAS EN ESTADO RECOCIDO

Descripción	Condición	Valor (Métrico)	Valor (Imperial)	Norma
Resistencia tracción	Recocido	370 - 700 MPa	54 - 102 ksi	ASTM E8
Límite elástico (0.2 %)	Recocido	250 - 450 MPa	36 - 65 ksi	ASTM E8
Alargamiento	Recocido	20 - 30 %	20 - 30 %	ASTM E8
Dureza Brinell	Recocido	120 - 200 HB	120 - 200 HB	ASTM E10

VI-Ñ2. *Propiedades físicas:* El carbono al tener densidad alta posee más resistencia y durabilidad. Gracias esto los hace más resistentes al calor sin llegar a derretirse, haciéndolo ideal para trabajos con temperaturas altas. Además, la capacidad que poseen deja que el calor y la energía eléctrica pase de forma eficiente convirtiéndolo así en un buen equipo de protección para equipos eléctricos o electrónicos [63].

Tabla III
PROPIEDADES FÍSICAS GENERALES DEL ACERO

Propiedad	Condición	Valor (Métrico)	Valor (Imperial)
Densidad	Ambiente	7.85 g/cm ³	0.284 lb/in ³
Punto de fusión	—	1425 - 1540 °C	2600 - 2800 °F
Conductividad térmica	Ambiente	50 W/m·K	29 BTU·in/h·ft ² ·°F
Capacidad calorífica	Ambiente	0.49 kJ/kg·K	0.12 BTU/lb·°F
Resistividad eléctrica	Ambiente	1.68e-8 Ω · m	1.68e-8 Ω · in

VI-O. Definición de policarbonato

El policarbonato es un termoplástico que posee claridad visual, dureza y resistencia a temperaturas altas. Ciertamente es parecido al plástico, pero sus propiedades lo hacen diferentes a otros materiales convencionales; llegando a comercializarse en formato compacto que es mas resistente y el celular que es muy ligero, ofreciendo un aislamiento térmico. El policarbonato contiene unidades repetidas de grupos de carbonato en su estructura química, está compuesto mediante la polimerización por condensación de Bisfenol y Fosgeno, y así se obtiene el policarbonato [64].

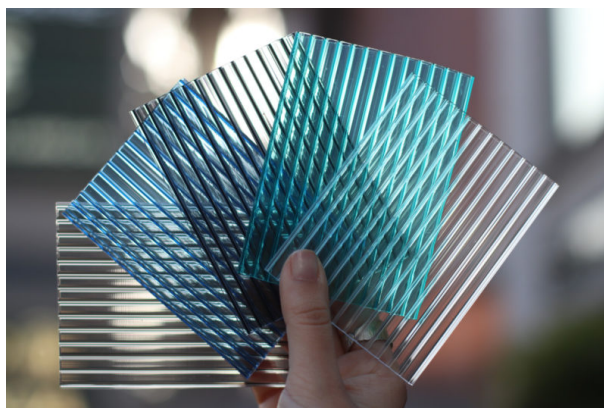


Figura 33. Laminas de policarbonato [65].

VI-P. *Propiedades del policarbonato*

La naturaleza amorfa del policarbonato se debe a la rigidez de su cadena principal, compuesta por grupos bencénicos. Esta configuración molecular impide que el material se cristalice, lo que da como resultado su transparencia característica y una baja contracción al momento de ser moldeado. Además de la versión estándar obtenida del Bisfenol A, existen variantes como el policarbonato de dialildietilenglicol, el cual se utiliza en aplicaciones ópticas especializadas, como lentes oftálmicas, debido a su ligereza y a un índice de refracción superior que mejora la nitidez visual.

VI-P1. Propiedades mecánicas: El policarbonato posee una gran resistencia al impacto, siendo 100 veces más resistente al vidrio y 30 veces más resistente que el acrílico. Pero, a diferencia del acero, si el policarbonato es sometido repetidamente vibraciones constantes puede debilitarse con el tiempo. Cuando se habla de resistencia a la tracción y elasticidad, el policarbonato posee un límite de deformación permanente definido. Esto quiere decir, que puede soportar cargas mecánicas de forma repetitiva sin que se deforme de manera permanente, mientras no se supere el umbral elástico (62MPa) [64].

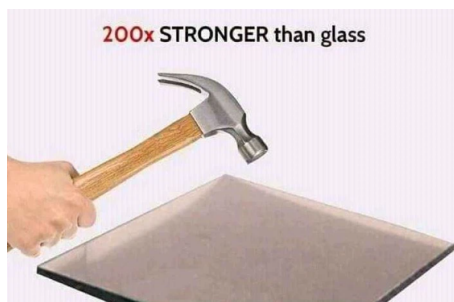


Figura 34. Resistencia del policarbonato [65].

Es relevante destacar que este material mantiene una notable capacidad para absorber energía de impacto a temperatura ambiente gracias a la movilidad de sus grupos moleculares laterales. Sin embargo, esta tenacidad presenta una dependencia crítica respecto a la temperatura; se observa que, a niveles extremadamente bajos, cercanos a los 0°C, dicha movilidad cesa, provocando que el material pase de un estado tenaz a uno frágil, lo que incrementa el riesgo de fracturas ante golpes secos en climas helados.

VI-P2. *Propiedades térmicas:* El policarbonato posee una gran estabilidad térmica, llegando a mantener su rigidez a temperaturas altas como 145°C a 150°C y temperaturas bajas, que, a diferencia de otros plásticos, llegan a deformarse incluso con el calor del ambiente, el policarbonato al estar expuesto a temperaturas altas sigue conservando su estructura y resistencia. Sin embargo, el policarbonato llega a expandirse o contraerse ante los cambios de temperatura, quiere decir que donde el policarbonato sea ubicado debe tener espacio suficiente para poder “moverse” en caso de que se expanda [64] [66].

Tabla IV
PROPIEDADES TÉRMICAS DEL POLICARBONATO

Parámetro térmico	Valor y descripción
Temperatura de transición vítrea (T_g)	147 °C (297 °F)
Temperatura de disipación térmica	0,45 MPa: 140 °C (284 °F)
Temperatura de disipación térmica	1,8 MPa: 128 - 138 °C (262 - 280 °F)
Temperatura de trabajo superior	115 - 130 °C (239 - 266 °F)
Menor temperatura de trabajo	-40 °C (-40 °F)
Conductividad térmica (k) a 23 °C	0,19 - 0,22 W/(m·K)
Difusividad térmica (a) a 25 °C	0,144 mm ² /s
Capacidad calorífica específica (c)	1,2 - 1,3 kJ/(kg·K)

En cuanto a su resistencia química, el policarbonato presenta una resistencia normal ante la exposición de ácidos orgánicos e inorgánicos como acetona e hidrocarburos. En términos de vida útil, el material no puede estar constantemente expuesto a la humedad, presenta sensibilidad si su estructura esta en contacto con agua caliente a 60°C por mucho tiempo, debido a ello, comenzaría a romperse. Así es como el material comienza a perder fuerza y peso, haciéndolo más frágil y que su superficie se vea deteriorada.

VI-P3. *Propiedades físicas:* El policarbonato es un plástico transparente que llega a transmitir el 90 % de la luz, llegando a parecerse al vidrio. También posee ligereza, perfecta para diseños en comparación con el vidrio, así aumenta su eficiencia facilitando el proceso de instalación. Además, pueden ser diseñados para evitar el paso de la radiación ultravioleta, ofreciendo protección [64].



Figura 35. Policarbonato de techado [64].

VII. MARCO METODOLÓGICO

VII-A. Diagrama de flujo

El siguiente diagrama de flujo inicia configurando los datos del sensor de temperatura, estableciendo la comunicación serial del microcontrolador para que se pueda enviar y recibir datos. Se leen los datos de temperatura del sensor y se define si se trabajará con un sistema analógico o con un sistema digital. Si se elige el sistema analógico, la opción digital se descarta e inicia su proceso, si no se elige ninguno de los dos sistemas, se debe revisar la comunicación. Dependiendo el sistema que se elija, inician los comandos para definir set point, medir las variables y enviar sus datos por vía serial. Luego de enviar los datos, se tiene el apartado de finalizar prueba o seguir con el estudio, si se finaliza, se enciende el ventilador para disipar el calor del circuito.

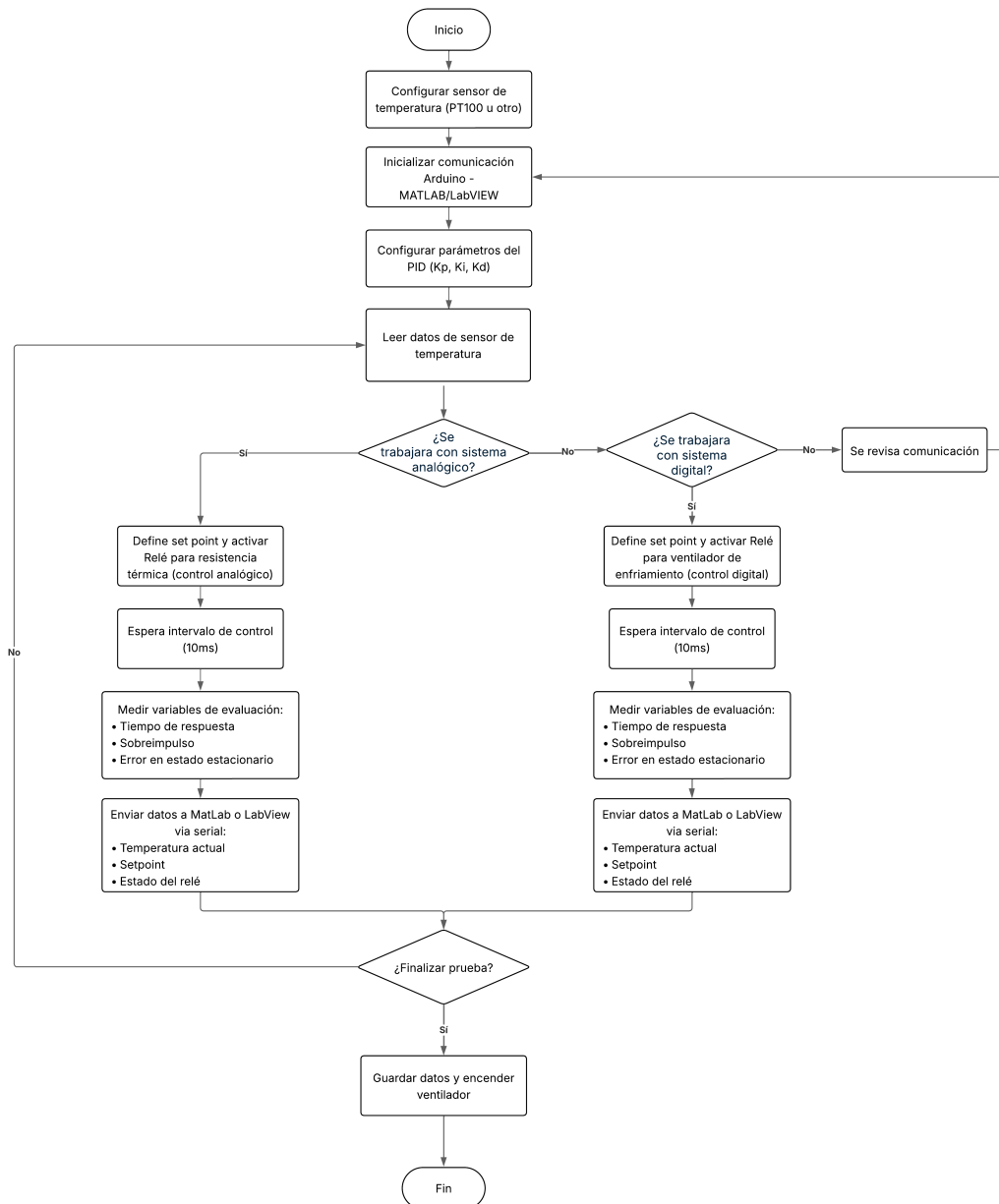


Figura 36. Diagrama de flujo de planta de temperatura, Elaborado por autores

VII-B. Diseño de prototipo

El diseño adoptado corresponde a un prototipo funcional, esto implica a la construcción física del dispositivo para validar los conceptos estudiados, de una manera experimental, en la se puede realizar la parametrización bajo las condiciones del usuario, con el propósito de verificar las respuestas del proceso y desempeño del controlador.

VII-C. Enfoque de investigación

La investigación emplea un enfoque cuantitativo, se fundamenta en la medición de las variables físicas relacionada con la dinámica de la planta. La temperatura emitida por la resistencia térmica, el error estacionario y la histéresis. Esos datos se representan numéricamente y dan paso a realizar un análisis comparativo. Esto facilita la verificación experimental del modelo matemático que describe el comportamiento térmico de la planta.

VII-D. Diseño electrónico de Rectificador de media onda controlado monofásico, con cruce por cero y aislamiento

El circuito desarrollado corresponde a un rectificador de media onda controlado, el funcionamiento se basa en sincronizar el sistema con la señal eléctrica, se implementa una detección por cruce por cero para establecer una referencia, dando así un tiempo de retardo para que se pueda realizar el disparo en el semiciclo. Al activarse el disparo justo después del cruce por cero, lo que causa es el recorte de la señal senoidal, dependiendo el tiempo de dar el disparo, será el tiempo en el que la carga estará recibiendo energía, logrando así un control de potencia.

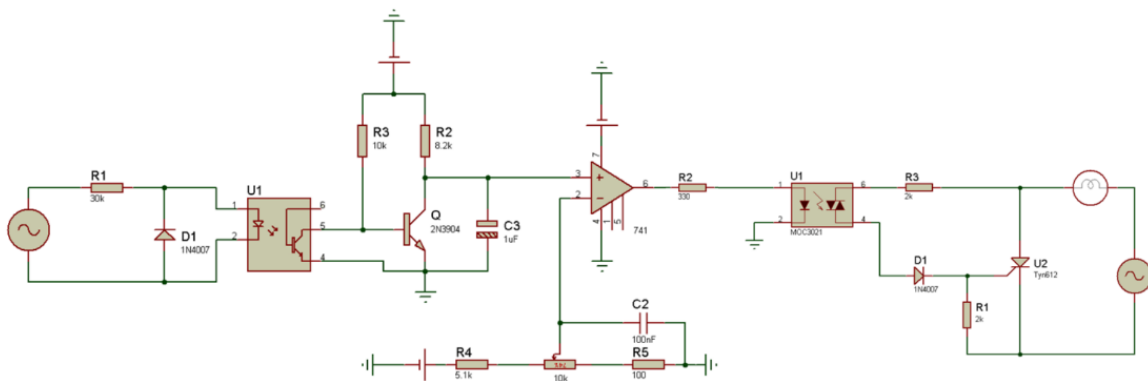


Figura 37. Rectificador media onda controlado monofásico, con cruce por cero y aislamiento [36].

VII-D1. Entrada AC y protección: El objetivo de este bloque es captar la red monofásica y condicionarla para su uso exclusivo de detección de cruce por cero, usando una resistencia limitadora, que lo que hará es reducir la corriente que fluye a través del diodo del optoacoplador, mientras que el zener protegerá al diodo mientras la señal se encuentre en el semiciclo negativo.

VII-E. Detección de cruce por cero con aislamiento

El led interno del optoacoplador realiza la conducción durante el semiciclo positivo y se apaga cuando la tensión se aproxima a cero. Esto genera una señal digital sincronizada, garantizando el aislamiento eléctrico entre el circuito de potencia y el de control electrónico.

VII-F. Generador de rampa

El generador de rampa sincronizada transforma la información dada por el detector de cruce por cero por medio de una señal analógica creciente, la pendiente de esta rampa es constante para cada semiciclo, esto garantiza el reinicio automático y el control.

VII-G. Comparador de fase

En este bloque de comparación de fase, compara las dos señales del circuito, es decir la del generador de rampa y una señal externa establecida en los rangos 0 a 10V, la salida no es proporcional a la entrada ya que depende del cruce de ambas señales.

VII-H. Generador de gate

El generador de pulso de disparo recopila la información dada por el comparador de fase, y hace el acondicionamiento del pulso eléctrico para la activación del gate del SCR, este pulso va a ser en un momento instantáneo con un retardo para que sea realizado en el semiciclo positivo.

VII-I. Actuador conmutado SCR + Carga

El SCR actúa como un conmutador, ya que es el que va a modificar la energía de manera proporcionada a la carga, tiene un comportamiento no lineal porque va a permanecer activo hasta que la corriente anódica esté por debajo de su valor mínimo.

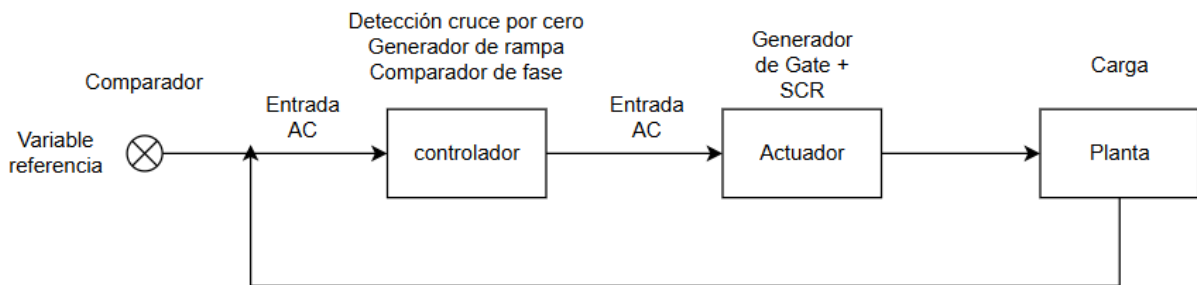


Figura 38. Sistema de control digital, Elaborado por autores

VII-II. Variable de referencia: Representa el valor de referencia o la temperatura ideal a la que se quiera llegar en el sistema, el sistema está basado en arduino y la variable se define por medio del monitor serial que comparará constantemente con la lectura del sensor.

VII-I2. Controlador Arduino: Su lógica interna traduce el mapeo de temperatura de 30 grados a 150 grados, a una escala de 0 a 255, mientras se mantenga la temperatura menor a los 30 grados, llegarán 0 voltios y si la temperatura supera el umbral, se saturará en 10 voltios.

VII-I3. Modulación PWM: En este bloque el arduino genera una modulación por ancho de pulso que varía según la resistencia térmica, el valor de 0 a 255 indica el porcentaje de tiempo en la que el ciclo de trabajo se encuentre, está calculado para que para que al pasar por el circuito de potencia se obtenga el voltaje deseado.

VII-14. *Filtro paso bajo RC*: El trabajo de este bloque es hacer la integración de estos pulsos para hacer una transformación a corriente continua, analógico y sobre todo que sea estable. Estos filtros elimina todo el ruido para que la señal sea suave en la etapa de potencia.

VII-15. *Acondicionamiento + escala*: Este bloque ya integra los amplificadores operacionales con la configuración no inversora, para poder amplificar la tensión con una ganancia de valor 2. El objetivo principal es escalar el valor dado por el arduino que es de 0 a 5 voltios y pasarlos a un valor de 0 a 10 voltios, asegurando que la resistencia calefactora reciba la potencia necesaria para cubrir los 150 grados.

VII-16. *Planta térmica*: Representa el valor físico en donde el voltaje que se acondicionó en el bloque anterior que es de 0 a 10 voltios, pueda ser convertido a temperatura mediante una resistencia de potencia, permite elevar la temperatura desde el ambiente hasta un límite superior a este de forma estable dependiendo el voltaje que se le administre.

VII-17. *Sensor MAX*: Este bloque hace la conversión de la temperatura actual y la traduce a un valor que pueda ser leído por el microcontrolador, es decir una señal digital. Al proporcionar la temperatura real, hace el feedback al bloque controlador, para la verificación del punto deseado en la operación.

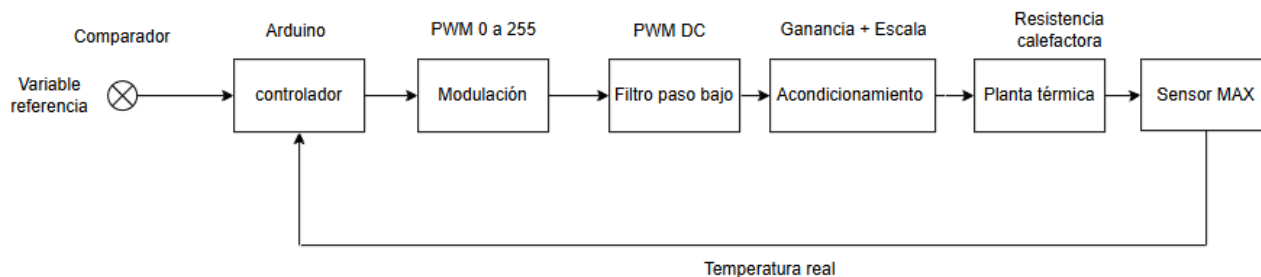


Figura 39. Sistema de control analógico, Elaborado por autores

VII-18. *Sistema rectificador de fase*: Este bloque representa el control analógico, en la que una señal AC alimenta un detector de cruce, por cero, un generador de rampa, el comparador de fase, generador de gate y actuador SCR + carga, esto permite un ajuste directo en tiempo real del ángulo de disparo de manera manual, en este caso por medio de un potenciómetro externo.

VII-19. *Sistema control digital*: Representa la automatización del sistema, en la que el microcontrolador hace el leído de la variable digital y la genera a un PWM. Esta señal pasa por un filtro paso bajo para obtener el voltaje proporcional de ganancia 2 y que sea escalada a un rango de 0 a 10 voltios, permitiendo una lectura precisa del sensor de temperatura.

VII-110. *Switch de selección*: Este bloque es uno de los más importantes porque permitirá al usuario hacer el cambio de un sistema a otro, en una posición permite conectar el comparador del sistema analógico, y en la segunda posición conmuta hacia la salida del filtro del microcontrolador, la función principal es que estos dos sistemas sean aislados y puedan trabajar por separados sin ningún problema.

VII-111. *Etapa de potencia*: Este bloque recibe la señal del sistema en el que se trabajará, el MOC aislará la etapa de potencia con la de control, activando el SCR para el recorte de la onda AC, la energía resultante es la que alimentará a la resistencia de potencia que será monitoreada.

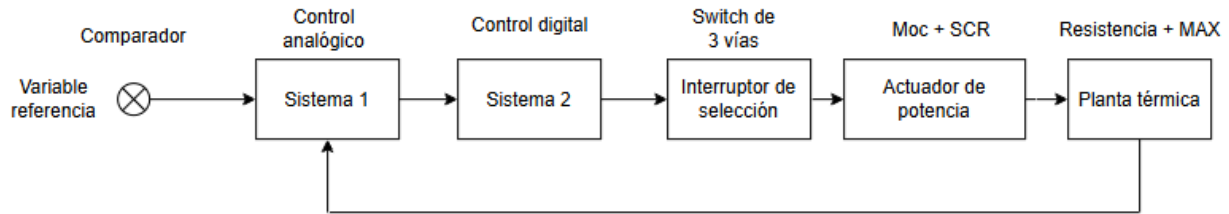


Figura 40. Sistema de control analógico y digital, Elaborados por autores

VII-112. *Generación de pulso de disparo:* En esta fase del circuito se usó los amplificador operacionales UA741 que junto el potenciómetro, permitiendo ajustar el retardo del disparo del SCR, para visualizar este fenómeno, a través de un osciloscopio el cual muestra de manera precisa la señal.

VII-113. *Diseño electrónico para lectura de temperatura:* Para poder ejecutar la lectura de temperatura se adicionó el circuito de la figura 47. el circuito es realizado con un microcontrolador y un módulo seleccionado por su amplio rango de medición en aplicación de temperaturas. La finalidad de este es adaptar la señal generada por la termocupla a los rangos que el microcontrolador requiere. La señal de entrada presenta valores en microvoltios por grados Celcius, los cuales son amplificados, compensados, filtrados y convertidos a forma digital por el módulo max, gracias a esto ya no se tiene que ajustar la ganancia de forma manual con resistencias externas evitando medidas inestables para el microcontrolador.

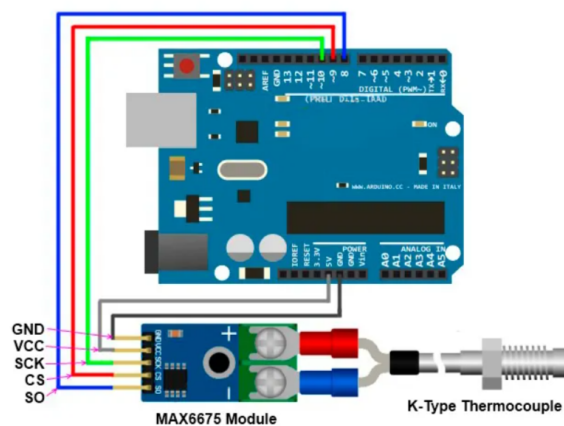


Figura 41. Módulo max6675 con arduino, Elaborado por autores

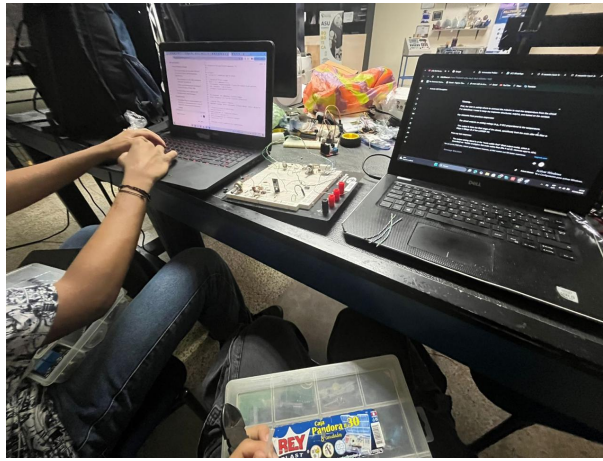


Figura 42. Pruebas de lectura de temperatura con termocupla tipo K

VII-I14. *Técnicas e instrumentos de recolección de datos:* El valor entregado por una termocupla es de $41 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ que proviene del efecto Seebeck, debido a la diferencia de voltaje es bajo, se usó un amplificador operacional encargado de incrementar la señal y que pueda ser procesada. La adquisición de datos se realiza mediante un microcontrolador que funciona como sistema DAQ, registrando los valores en tiempo real y enviándolos a la computadora para su almacenamiento y análisis. Se utiliza un osciloscopio para calibrar las señales de salidas del rectificador de media onda en la etapa del circuito de potencia y así garantizar la correcta operación del dispositivo.

VII-J. Fase de Diseño y fabricación del PCB

VII-J1. *Selección de herramienta de diseño:* Para el diseño del circuito impreso en PCB se utilizó la plataforma de EasyEDA, una herramienta de diseño electrónico con una amplia biblioteca de elementos, que permite la elaboración de circuitos y la generación de archivos de fabricación, esta plataforma es bastante accesible y compatible con formatos estándar a nivel industrial. Esta plataforma también permite el enlace entre un circuito esquemático y el diseño físico facilitando la interconexión de elementos.

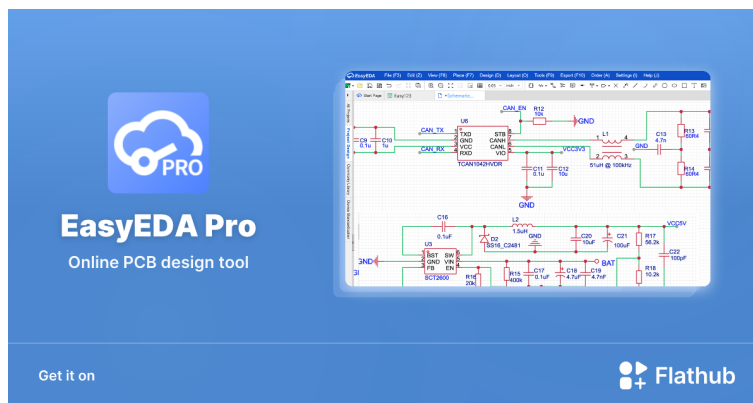


Figura 43. Plataforma EasyEDA [23].

VII-J2. *Diseño esquemático:* El diseño esquemático del sistema de rectificador de media onda controlado se realizó con el propósito de representar de manera clara y objetiva el funcionamiento del circuito propuesto

antes de la implementación. Este circuito permite establecer las conexiones de los elementos así como verificar la compatibilidad en las distintas etapas, esto es fundamental para el diseño impreso del prototipo.

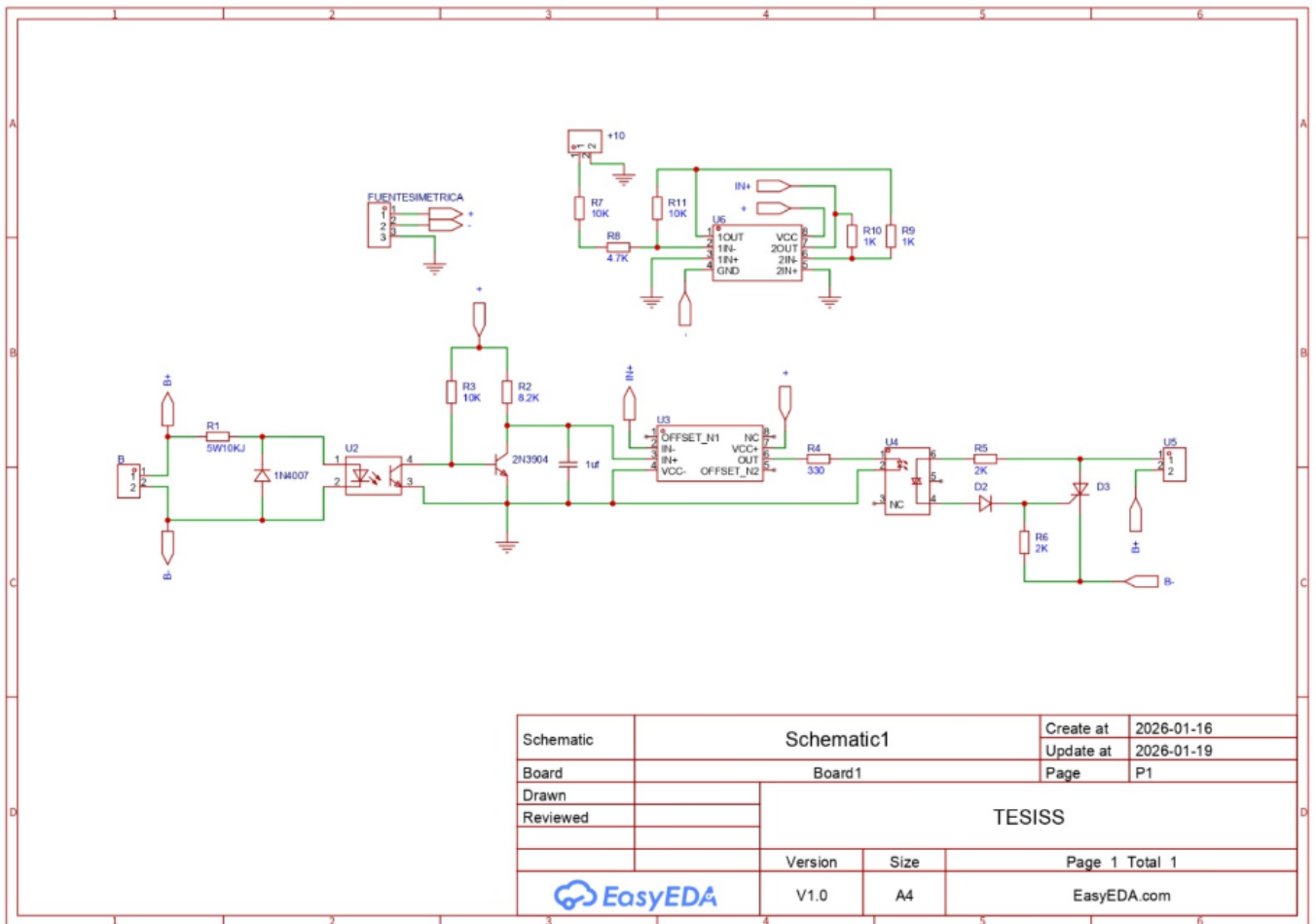


Figura 44. Circuito Rectificador EasyEDA, Elaborado por autores

El diseño esquemático del sistema conformado por dos microcontroladores, se diseñó para la lectura de la temperatura con un módulo max6675. El arduino genera un PWM de 0 a 5V y pasa por filtros paso bajo RC para poder ser convertida en una señal analógica, la salida del filtro se dirige a los amplificadores operacional en los que se escala la ganancia, tienen conectados divisores de resistencias para poder tener el rango deseado de 0 a 10V.

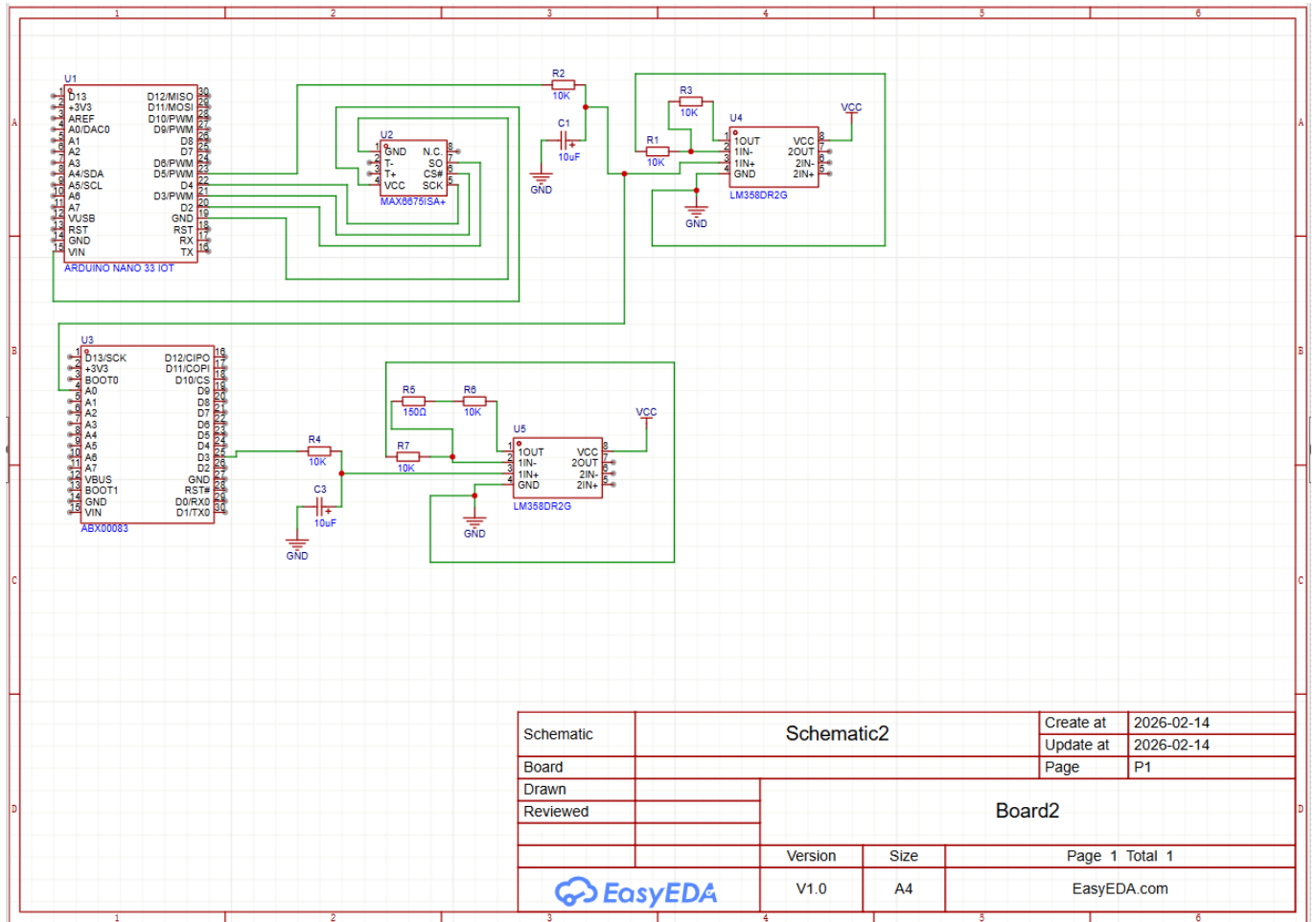


Figura 45. Circuito EasyEDA generación PWM y lectura de pines analógicos y digitales, Elaborado por autores

Diseño esquemático de circuito final con la integración de modo analógico y digital controlado por un switch de 3 vías llamado ojo de cangrejo, lo que permite que el circuito pueda trabajar en cualquiera de estos dos modos mencionados.

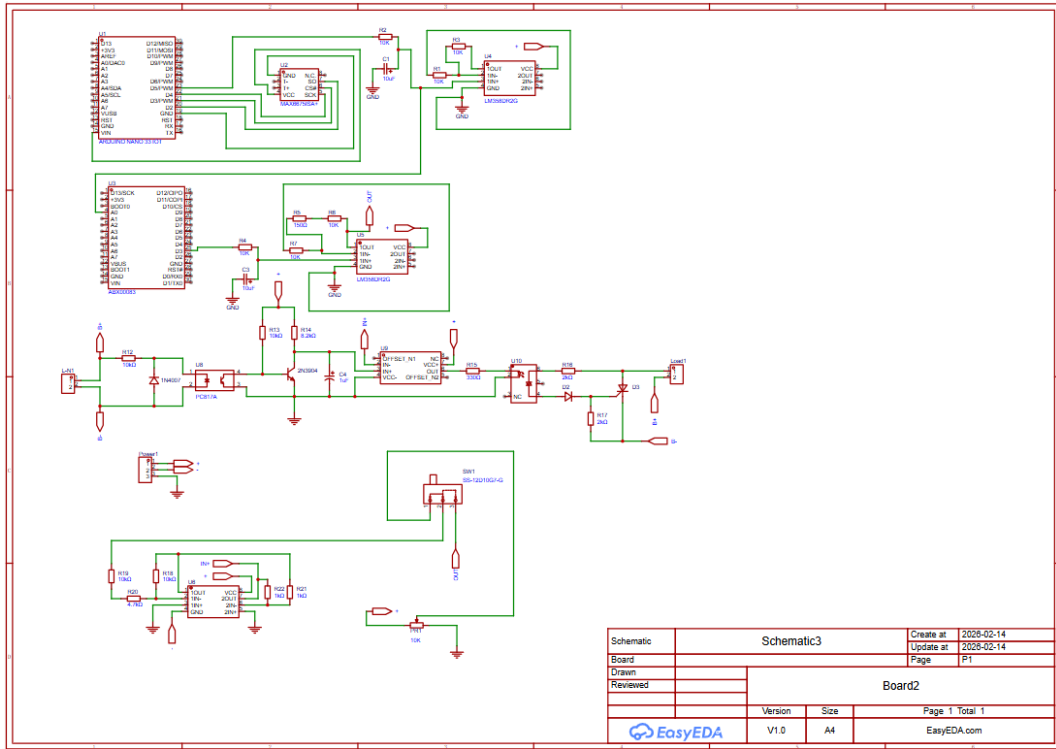


Figura 46. Circuito final EasyEDA, Elaborado por autores

VII-J3. *Diseño PCB:* Diseño de circuito de rectificador de media onda.

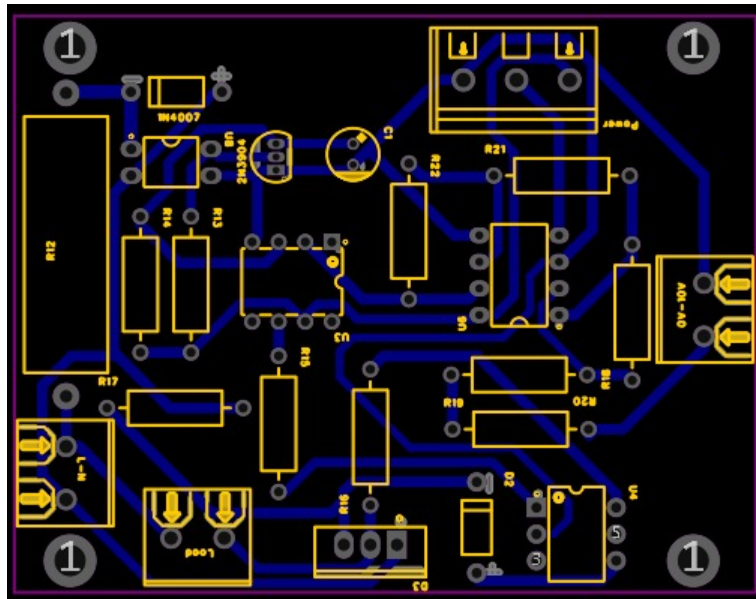


Figura 47. Diseño PCB circuito rectificador, Elaborado por autores

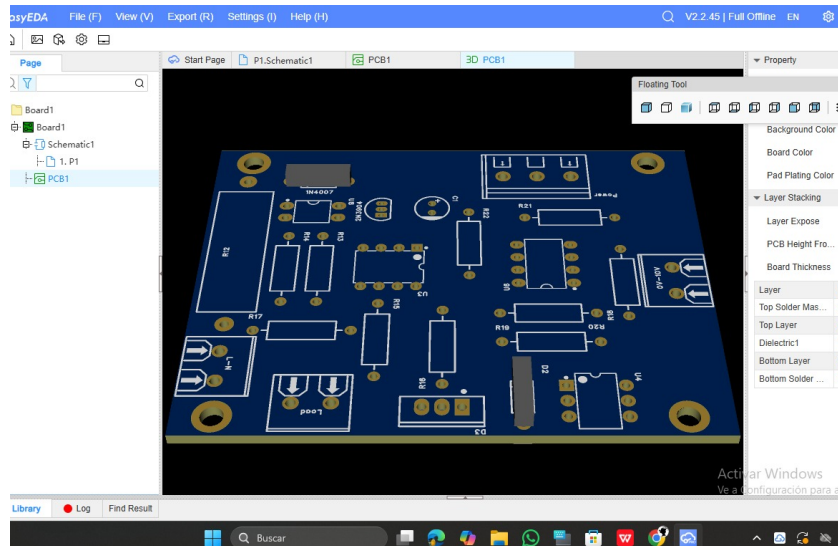


Figura 48. Diseño PCB circuito rectificador, Elaborado por autores

VII-K. Fase de Diseño y Modelado de la Planta

VII-K1. Diseño Estructural: El chasis se diseñó teniendo en cuenta los criterios de aislación térmica, forma de distribución interna entre sensor y objeto a sensar. Posee una estructura con compartimento de lado izquierdo de la planta donde sera ubicado el microcontrolador y el circuito; de esta manera se pueden evitar motivos de calor directo o interferencias con estática o ruido eléctrico. Del lado derecho se encuentra otro compartimento aislado donde es ubicado el termocupla tipo K. Esta disposición permitirá que las mediciones puedan ser estables debido al aislamiento, este reduciría interferencias no deseadas del sensor. El chasis mostrado en la figura 55, se observa que en la parte frontal muestra una estructura con un volumen adecuado para la integración del objeto que se requerirá sensar; ademas de los controles manuales también proporcionados. Estos controles fueron integrados con potenciómetros, permitiendo ajustar los parámetros K_p , K_i , K_d y el valor del set point. Este facilita la obtención de una calibración óptima del sistema durante una práctica y la operación en tiempo real.

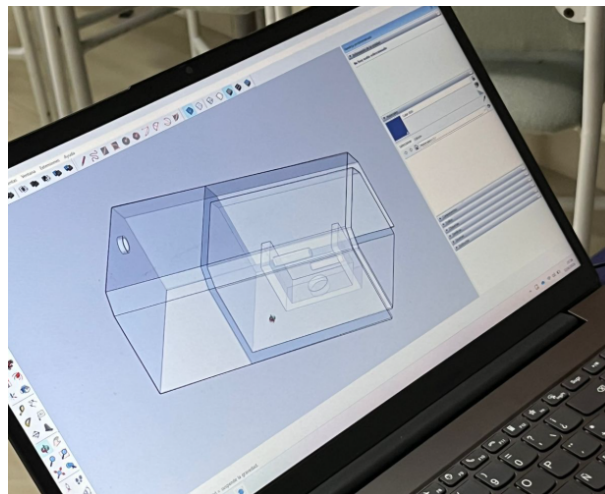


Figura 49. Boceto de chasis, Elaborado por autores

Para validar el diseño del gabinete, es necesario realizar análisis a su estructura, permitiendo anticipar fallos antes de realizar alguna manipulación en físico. Este procedimiento permitió asegurar que el gabinete metálico cumpliera con los requerimientos de protección establecidos, siendo capaz de soportar cargas térmicas, gestionando eficientemente el calor generado por los circuitos electrónicos. El diseño del gabinete se realizó en el software de SolidWorks. Se tomó como base la ficha técnica del gabinete metálico hecho por la empresa de “BEAUCOUP”, en donde se detallaban los materiales por el que está compuesto el gabinete, más el espesor de la lámina de acero. El cuerpo es un monobloque con dimensiones de 200x200x150mm, cuenta con un espesor de lámina de 0.8mm, un espesor de 65 micras por el recubrimiento texturizado de pintura poliéster RAL 7032.

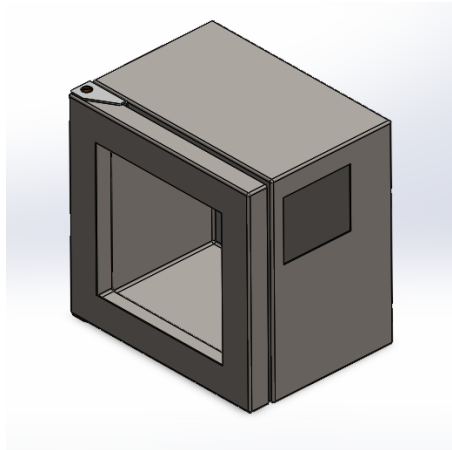


Figura 50. Diseño de estructura de planta en SolidWorks, Elaborado por autores

VII-K2. Caracterización del material y propiedades físicas: Luego de haber diseñado el gabinete en SolidWorks, se asignan las propiedades del material según lo que dice la ficha técnica, en este caso es acero al carbono laminado en frío, se selecciona el material “AISI 1020 Acero Laminado en Frio” esto permite realizar un análisis térmico más acertado.

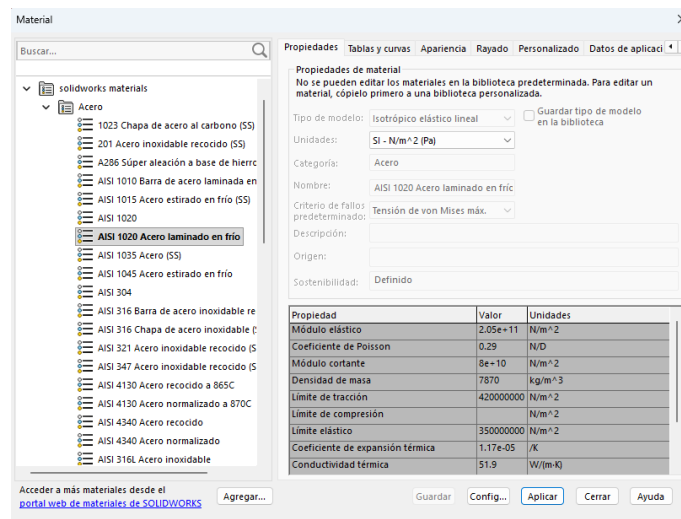


Figura 51. Selección del material del gabinete

Para la cara frontal, lateral y bases de protección para circuitos, se eligió el Policarbonato pensando en transformar la planta en un entorno de aprendizaje transparente y seguro. Este material permite que el estudiante observe el comportamiento real de los componentes sin exponerse al calor interno, gracias a su excelente capacidad como aislante térmico. Al integrar sus propiedades en SolidWorks, validamos un diseño que prioriza la curiosidad visual del usuario, manteniendo siempre una barrera de protección nítida que no se deforma con las temperaturas de operación de la resistencia.

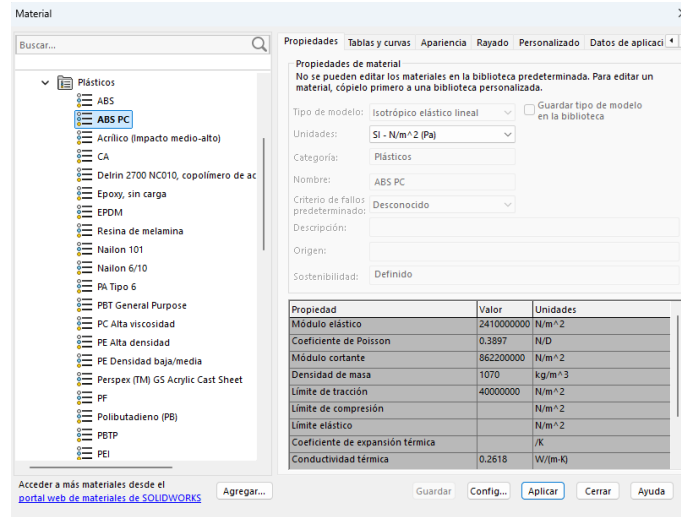


Figura 52. Selección del material de pared frontal, lateral y bases de protección de componentes

VII-L. Escalamiento de la señal de temperatura a PWM

El sistema hace uso de un microcontrolador *Arduino* para generar una señal PWM de 8 bits, cuyo rango digital está comprendido entre 0 y 255. La variable medida es la temperatura T , obtenida mediante el sensor MAX6675, la cual opera dentro del intervalo:

$$T_{\text{mín}} = 30^{\circ}\text{C} \quad ; \quad T_{\text{máx}} = 150^{\circ}\text{C} \quad (10)$$

Se requiere realizar una conversión lineal que permita mapear este rango de temperatura al rango digital del PWM:

$$T_{\text{mín}} = 30^{\circ}\text{C} \quad ; \quad T_{\text{máx}} = 150^{\circ}\text{C} \quad (11)$$

Se requiere realizar una conversión lineal que permita mapear este rango de temperatura al rango digital del PWM:

$$T \in [30, 150]^{\circ}\text{C} \longrightarrow \text{PWM} \in [0, 255] \quad (12)$$

VII-M. Obtención de la ecuación de escalamiento

Se asume una relación lineal de la forma:

$$y = mT + b \quad (13)$$

donde:

- T es la temperatura medida.
- y es el valor del ciclo útil PWM (duty).
- m es la pendiente de la recta.
- b es la ordenada al origen.

VII-N. Cálculo de la pendiente

Se utilizan los dos puntos extremos del sistema:

$$(T_{\text{mín}}, y_{\text{mín}}) = (30, 0) \quad (14)$$

$$(T_{\text{máx}}, y_{\text{máx}}) = (150, 255) \quad (15)$$

La pendiente se obtiene como:

$$m = \frac{y_{\text{máx}} - y_{\text{mín}}}{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}} \quad (16)$$

Sustituyendo:

$$m = \frac{255 - 0}{150 - 30} = \frac{255}{120} \quad (17)$$

$$m = 2,125 \quad (18)$$

VII-Ñ. Cálculo de la ordenada al origen

Usando el punto (30, 0):

$$0 = m(30) + b \quad (19)$$

$$b = -30m \quad (20)$$

$$b = -30 \left(\frac{255}{120} \right) \quad (21)$$

$$b = -63,75 \quad (22)$$

VII-O. Ecuación final de conversión

La relación entre temperatura y valor PWM queda:

$$y = \frac{255}{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}} (T - T_{\text{mín}}) \quad (23)$$

Sustituyendo valores:

$$y = \frac{255}{120}(T - 30) \quad (24)$$

Esta forma es preferida porque garantiza que:

$$T = T_{\text{mín}} \Rightarrow y = 0 \quad (25)$$

$$T = T_{\text{máx}} \Rightarrow y = 255 \quad (26)$$

VII-P. Implementación digital

El microcontrolador trabaja con valores enteros, por lo que el ciclo útil aplicado es:

$$\text{duty} = \left\lfloor \frac{255(T - T_{\text{mín}})}{T_{\text{máx}} - T_{\text{mín}}} \right\rfloor \quad (27)$$

En código:

```
duty = (int) (255*(tempC - T_MIN) / (T_MAX - T_MIN));
```

VII-Q. Conversión del PWM a voltaje analógico

Luego del filtrado pasabajo, el PWM se comporta como un DAC equivalente:

$$V_{PWM} = \frac{\text{duty}}{255} V_{cc} \quad (28)$$

Para $V_{cc} = 5V$:

$$V_{PWM} = \frac{\text{duty}}{255} \cdot 5 \quad (29)$$

VII-R. Escalamiento mediante amplificador operacional

El amplificador operacional se configura como no inversor:

$$A_v = 1 + \frac{R_f}{R_g} \quad (30)$$

Por tanto, el voltaje aplicado a la planta es:

$$V_{out} = \left(1 + \frac{R_f}{R_g}\right) \frac{\text{duty}}{255} V_{cc} \quad (31)$$

Si se diseña $A_v = 2$, entonces:

$$V_{out} = \frac{\text{duty}}{255} \cdot 10V \quad (32)$$

obteniéndose así un rango analógico de 0 a 10V proporcional a la temperatura medida.

VII-S. Unión de lo digital con lo manual

VII-S1. Enfoque de diseño del prototipo: El desarrollo de la planta de control de temperatura se alejó de la idea de ser una simple suma de cables y componentes electrónicos; por el contrario, se concibió como un ejercicio

de ingeniería consciente que buscaba trasladar la complejidad del entorno industrial al espacio del laboratorio. La metodología partió de una visión integradora: crear una arquitectura híbrida donde pudieran convivir, en perfecta armonía, la fiabilidad del control analógico de toda la vida y la versatilidad que ofrecen los sistemas digitales modernos. Para convertir esta visión en una realidad tangible, se optó por un enfoque de diseño modular. Esta decisión no solo facilitó la organización técnica, sino que permitió tratar cada etapa del sistema, desde la captura de datos hasta la gestión de potencia, como un bloque con identidad propia. Esta estructura por módulos no solo garantiza un funcionamiento más ordenado, sino que invita a quien interactúa con la planta a comprender el sistema pieza por pieza, transformando un equipo técnico en una herramienta de aprendizaje mucho más cercana y comprensible. F

VII-S2. Diseño del uso de doble microcontrolador: Uno de los pilares metodológicos fue la decisión de utilizar una configuración de dos microcontroladores. Esta elección no fue arbitraria; se fundamentó en la necesidad de distribuir las tareas de procesamiento para garantizar una respuesta en tiempo real. Mientras que un microcontrolador se especializa en la lectura crítica de la temperatura mediante el protocolo de comunicación del módulo MAX6675, el segundo se encarga de la gestión de las interfaces y la ejecución del algoritmo de control. Esta separación de funciones permite que el sistema mantenga una estabilidad operativa constante, evitando que los procesos de visualización o conectividad interfieran con la precisión del lazo de control PID.

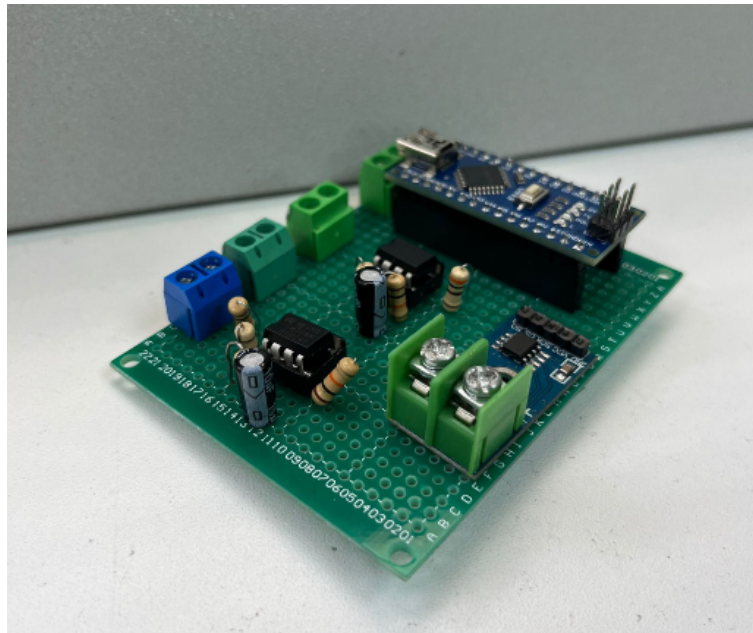


Figura 53. Placa de microcontrolador, Elaborado por autores

VII-S3. Software y gestión de datos: La inteligencia del prototipo reside en una estructura de software diseñada para ser modular y eficiente. La metodología de programación se alejó de los ciclos de ejecución lineales y se optó por un sistema basado en interrupciones y tiempos de muestreo precisos. Esto es vital en el control de temperatura, donde los cambios no son instantáneos y el procesador debe ser capaz de leer, calcular y actuar sin retrasos que puedan desestabilizar el sistema. El flujo de datos comienza en el primer microcontrolador, el cual actúa como el nodo de adquisición. El software aquí implementado gestiona la comunicación mediante el protocolo SPI para extraer los datos térmicos del módulo MAX6675. Se incluyó un algoritmo de filtrado digital por media móvil para

suavizar las lecturas del sensor, eliminando posibles picos de ruido eléctrico que podrían confundir al sistema de control.

VII-T. Análisis para una señal estable

VII-T1. Acondicionamiento de Señal: La precisión del sistema depende enteramente de la calidad de la señal capturada. Por ello, se implementó un proceso de acondicionamiento de señal que transforma los datos digitales del entorno embebido en señales compatibles con los estándares industriales.

- **Conversión de Señal Digital a Analógica (PWM a DC):** El sistema utiliza la técnica de modulación por ancho de pulso (PWM) generada por el Arduino, con una amplitud de 0 a 5V. No obstante, para que esta señal sea útil en un entorno industrial, se diseñó una etapa de filtrado paso bajo de tipo RC. La metodología para el cálculo de este filtro se centró en encontrar una frecuencia de corte que permitiera suavizar los pulsos digitales y obtener una señal analógica continua con el mínimo rizado posible.
- **Escalamiento y Ganancia:** Dado que los equipos industriales suelen operar en rangos de 0 a 10V, se diseñó una etapa de amplificación operacional. Mediante el uso de divisores de tensión de precisión y una configuración de ganancia calculada, se logró escalar la señal filtrada de 5V al rango deseado de 10V. Este procedimiento garantiza que la planta pueda integrarse con otros controladores comerciales o actuadores que utilicen voltajes estándar.

VII-T2. Configuración y conexión física del sistema analógico: La metodología de diseño contempló que la planta debe ser capaz de operar en un entorno puramente industrial. Para ello, se estableció la conexión física del sistema analógico bajo los estándares de instrumentación de 0 – 10V. Físicamente, esta etapa se conecta a través del filtro paso bajo RC y los amplificadores operacionales previamente mencionados. El cableado se diseñó utilizando cable UTP para minimizar el ruido electromagnético. En este modo, el sistema omite el procesamiento digital de la señal de error y permite que una referencia de voltaje externa gobierne el disparo del rectificador. Las conexiones se centralizaron en una regleta de bornes industriales dentro del gabinete, facilitando que el usuario pueda medir con un multímetro cada punto de prueba sin riesgo de cortocircuito.

VII-T3. Configuración y conexión física del sistema digital: En contraste, la conexión física del sistema digital se fundamenta en la comunicación serial y protocolos de datos entre los microcontroladores y el sensor de temperatura. La arquitectura digital se conecta en físico mediante el módulo MAX6675, el cual requiere una conexión SPI (Serial Peripheral Interface). Para evitar caídas de tensión que afecten las lecturas, se implementó una red de alimentación común con capacitores de desacoplo en cada integrado. La conexión digital fluye desde la termocupla hacia el primer microcontrolador, el cual envía la información procesada al segundo dispositivo encargado de la interfaz de usuario. Este cableado se organizó de forma estética y funcional mediante el uso de cable UTP y jumers, separando físicamente los cables de datos de los cables de potencia para evitar la inducción de ruido en las señales de alta sensibilidad.

VII-T4. Lógica de interconexión y comunicación de microcontrolador: Para evitar la saturación de un solo procesador, la metodología de software distribuyó la carga de trabajo. El intercambio de información entre los dos microcontroladores se realiza mediante un bus de datos que garantiza la integridad de la temperatura leída y el estado del sistema. El segundo microcontrolador se encarga de la lógica de la interfaz de usuario y de la generación de la señal de salida. El software fue programado para traducir los requerimientos del usuario en comandos de voltaje. Esta separación de tareas permite que, mientras uno de los dispositivos está ocupado actualizando la

pantalla o gestionando la conectividad, el otro siga monitoreando la temperatura sin interrupciones, garantizando así la seguridad de la planta en todo momento.

VII-U. Control de potencia y switch de selección

VII-U1. *Integración del selector de modo Ojo de Cangrejo:* Una pieza clave en la metodología de operación es la inclusión de un switch de tres vías, técnicamente conocido como ojo de cangrejo. El diseño esquemático incluyó este componente para dotar a la planta de una flexibilidad única:

- Modo Digital: Donde el algoritmo PID reside en el microcontrolador.
- Modo Analógico: Donde la planta puede ser controlada por fuentes externas o manuales.

La integración de este selector permite realizar pruebas comparativas entre distintos métodos de control, convirtiendo al prototipo en una herramienta de investigación y diagnóstico, más que en un simple equipo de laboratorio.

VII-U2. *Diseño y desarrollo de la etapa de potencia:* La etapa de potencia es el componente de la planta encargado de gestionar la energía que alimenta a la resistencia calefactora. En este proyecto, se optó por una configuración de rectificador de media onda controlado. Esta decisión metodológica permite un control preciso sobre el ángulo de disparo del semiconductor (SCR), lo que a su vez regula la cantidad de voltaje promedio entregado a la carga. A diferencia de un control on/off simple, la rectificación controlada permite una respuesta mucho más suave y profesional del lazo de control PID. Para la implementación, se diseñó un esquema que garantiza el aislamiento galvánico entre la etapa de control (Arduino) y la de potencia (AC), utilizando optoacopladores de cruce por cero. Esto asegura que cualquier falla en la línea de alta tensión no afecte a los microcontroladores, protegiendo así la inversión tecnológica del prototipo.

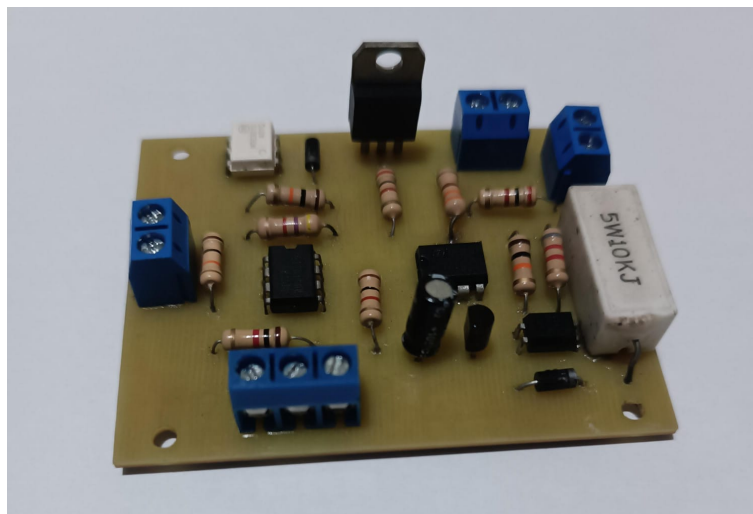


Figura 54. Placa de rectificador de media onda, Elaborado por autores

VII-U3. *Gestión del selector Ojo de Cangrejo:* Una de las innovaciones en la lógica del sistema es la interpretación del estado del interruptor de tres vías. El software fue diseñado para reconocer físicamente la posición del selector y reconfigurar la ruta de la señal de control en milisegundos.

- Lógica de Modo Digital: Al detectar el cierre del circuito en la posición digital, el microcontrolador activa sus salidas PWM y toma el control total de la etapa de potencia basándose en la referencia programada.
- Lógica de Modo Analógico: Al conmutar al modo analógico, el software entra en un estado de "monitoreo pasivo". En este estado, el microcontrolador deja de enviar señales de control al rectificador, permitiendo

que el hardware analógico externo gobierne la planta, pero sigue registrando y mostrando la temperatura en pantalla para que el usuario mantenga el control visual del proceso.

VII-V. *Diseño y análisis de estructura*

VII-VI. *Estudio funcional del gabinete:* El diseño del chasis se alejó de la idea de ser un simple contenedor para convertirse en una pieza clave de la seguridad y la eficiencia operativa del sistema. Al elegir el material, se optó por el acero al carbono, no solo por su firmeza estructural, sino por la protección que ofrece al bloquear interferencias electromagnéticas que podrían alterar las lecturas del sensor. El modelado en 3D se guio por una lógica de orden y claridad, buscando que cada componente tuviera su lugar justo. Se establecieron fronteras físicas dentro del gabinete para que la electrónica de precisión no conviviera directamente con el calor y el ruido de la corriente alterna. Cada corte y perforación en el metal se planeó con cuidado, asegurando que la integración de pantallas y el selector ojo de cangrejo no debilitaran la estructura general.

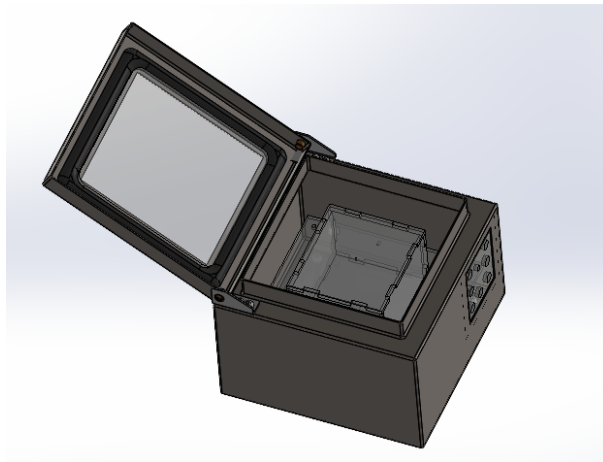


Figura 55. Diseño final en diseño en SolidWorks, Elaborado por autores

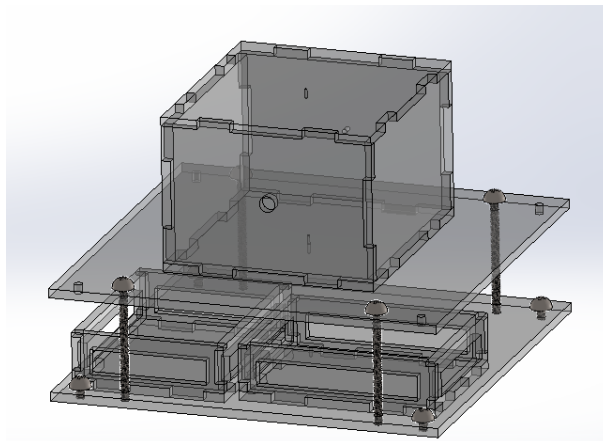


Figura 56. Estructura interna diseñado en SolidWorks, Elaborado por autores

VII-V2. *Análisis del comportamiento térmico:* Entender cómo se mueve el calor dentro de un espacio cerrado es vital para evitar fallos inesperados. Por esta razón, se utilizó la simulación de flujo para observar el aliento del sistema antes de construirlo. Dado que el rectificador y la resistencia generan temperaturas elevadas, era prioritario proteger componentes sensibles como los microcontroladores y los filtros RC, cuya precisión se degrada con el calor excesivo.

Para este análisis, se recreó un escenario realista:

- Fuentes de Calor: Se asignó a cada componente la energía térmica que desprende según su uso real, evitando subestimar el calentamiento del sistema.
- Clima de Laboratorio: Se simuló una temperatura ambiente de 25°C, típica de un espacio de estudio, para observar el comportamiento en condiciones cotidianas.
- Estrategia de Ventilación: Se estudió el aire no como una ráfaga desordenada, sino como un flujo que debe atravesar los puntos más críticos de forma fluida.

Este estudio permitió descubrir áreas donde el aire caliente se quedaba atrapado, lo que llevó a rediseñar la ventilación para asegurar que el interior nunca superara una temperatura alta más de 100°C. Con esto, se garantiza que la planta no solo funcione, sino que tenga una vida útil prolongada y lecturas siempre estables.

VII-W. *Ensamblaje y pruebas*

VII-W1. *Ensamblaje de prototipo:* Dar vida al prototipo fue un proceso que demandó orden y no se trató simplemente de unir partes, sino de seguir un camino lógico que permitiera que el diseño en papel se transformara en una máquina funcional y segura. El montaje se cuidó detalle a detalle, dividiéndose en momentos clave que reflejan la calidad técnica del proyecto:

- Preparación y Arquitectura del Chasis: El trabajo comenzó con la intervención directa sobre el gabinete metálico. Las perforaciones y cortes se realizaron con las medidas necesarias, entendiendo que el gabinete es el "hogar" de todo el sistema. Al ubicar la fuente y los PCB's, se buscó algo más que un soporte técnico; se buscó crear una estructura interna donde el cableado pudiera descansar de forma organizada, permitiendo que cualquier persona que abra el equipo en el futuro pueda entender su lógica a primera vista.
- Ubicación de la Etapa de Potencia: Al instalar elementos como el rectificador y la fuente, se tuvo presente que estos son los componentes que más energía y calor manejan. En lugar de esconderlos, se colocaron en posiciones cerca de la ventilación. Este gesto asegura que el sistema pueda liberar el calor de forma natural, evitando que la temperatura se acumule y permitiendo que la planta trabaje con "aliento propio", sin asfixiar a los componentes más delicados.
- Integración Sensible de la Electrónica: Las placas de circuito impreso, que contienen el cerebro del sistema, se montaron con especial cuidado sobre soportes aislantes. Esta separación actúa como un escudo protector que evita cualquier contacto accidental con el metal del chasis. El cableado no fue una tarea al azar; se utilizó un código de colores estandarizado, pensando en la claridad y en la facilidad de mantenimiento.
- Validación de Seguridad y Primer Encendido: Antes de que la electricidad recorriera el sistema por primera vez, se realizó una inspección. Se verificó con detalle que el aislamiento fuera correcto y que la tierra física estuviera lista para proteger al usuario. Este último paso es el que otorga la tranquilidad necesaria, confirmando que la planta no solo es una máquina capaz de controlar temperatura, sino un entorno seguro diseñado por y para personas.

VII-W2. Pruebas y validación del sistema: Una vez finalizado el ensamble físico y la carga del software, la metodología de trabajo se centró en una fase de validación rigurosa. El objetivo no fue solo comprobar que la planta "encendiera", sino asegurar que el comportamiento térmico fuera repetible y que la transición entre los modos de control no generara inestabilidad en el sistema.

Se establecieron protocolos de prueba bajo tres escenarios críticos:

- Prueba de Lazo Abierto: Se aplicaron escalones de potencia manuales para observar la inercia térmica del sistema y determinar el tiempo de retardo desde que se activa el rectificador de media onda hasta que la termocupla detecta el incremento de temperatura.
- Prueba de Conmutación en Caliente: Se cambió la posición del selector "ojo de cangrejo" mientras la planta estaba operando. Esta prueba validó que la electrónica de protección y la lógica del software fueran capaces de manejar el cambio de control (de digital a analógico) sin producir picos de voltaje que dañaran la resistencia calefactora.

VII-W3. Análisis de errores y calibración: Para garantizar la veracidad de los datos mostrados en la interfaz, se realizó una metodología de calibración cruzada. Se utilizó un termómetro digital industrial de referencia para comparar las lecturas obtenidas por la termocupla tipo K gestionada por el sistema digital. Los errores detectados, producto de pequeñas variaciones en la ganancia de los amplificadores operacionales o el rizado del filtro RC, fueron compensados mediante software. Este proceso de "ajuste fino" permitió que la planta tuviera una desviación menor al 1% en el rango de operación industrial, lo que la convierte en una herramienta de alta precisión para experimentos académicos.

VII-W4. Consideraciones finales: Se verificó que el cableado digital y el de potencia mantuvieran la separación física establecida en el diseño para evitar la interferencia electromagnética. Se etiquetaron los bornes y conectores externos, asegurando que la planta sea intuitiva para un usuario que no esté familiarizado con el diseño interno. Este enfoque metódico garantiza que el producto final sea una planta de control robusta, profesional y lista para enfrentar las exigencias de cualquier laboratorio de automatización o mecatrónica del país.

VIII. RESULTADOS

VIII-A. Validación de la etapa de potencia y control de fase

VIII-A1. *Señal senoidal y rectificadora:* Al energizar la etapa de potencia, se validó la integridad de la señal senoidal de entrada, confirmando que el proceso de rectificación controlada se ejecuta de manera simétrica. Este resultado es fundamental, ya que demuestra que la planta no solo recibe energía, sino que es capaz de procesarla para que el sistema de control actúe con precisión sobre la resistencia calefactora, garantizando un flujo energético estable desde el inicio del proceso.



Figura 57. Señal senoidal de entrada AC con señal rectificadora controlada, Elaborado por autores

VIII-A2. *Respuesta cerca del umbral de 10V:* Uno de los logros más significativos en las pruebas físicas fue la verificación del comportamiento del sistema en valores críticos de voltaje. Se observó que, al aproximarse al umbral de los 10 voltios, el sistema responde con un apagado total de la carga de forma suave y sin oscilaciones peligrosas. Esta respuesta asegura que el prototipo es capaz de gestionar situaciones de mínima potencia, evitando el desperdicio de energía y protegiendo los componentes ante posibles picos de corriente residual.

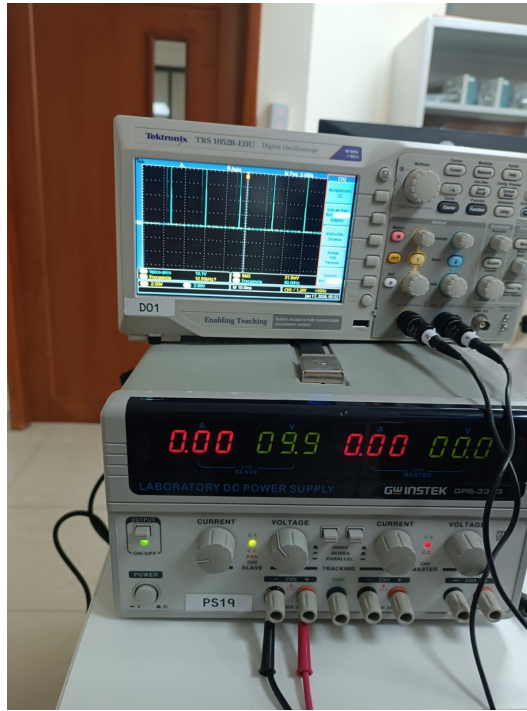


Figura 58. Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios para el apagado total de la carga, Elaborado por autores

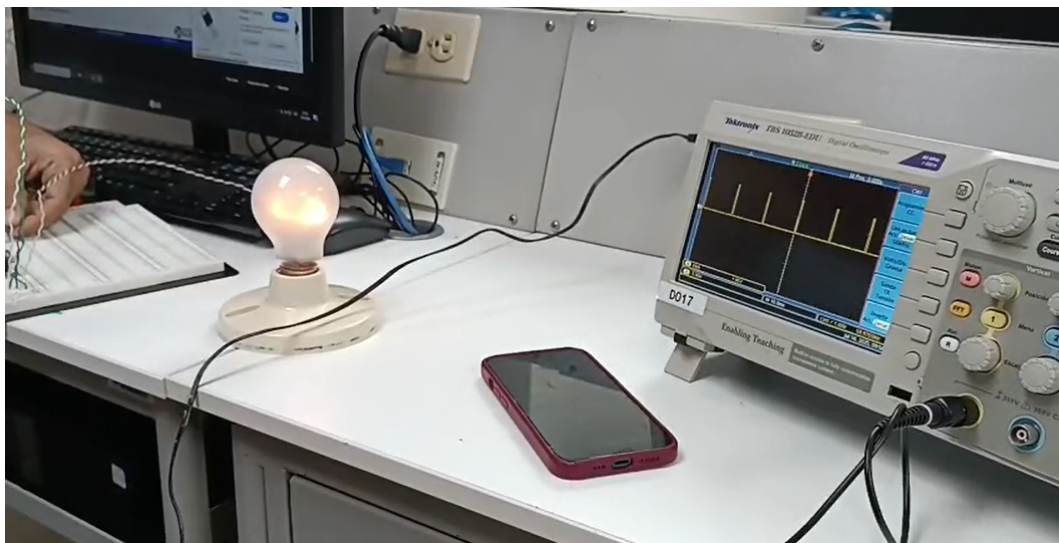


Figura 59. Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios con carga, Elaborado por autores

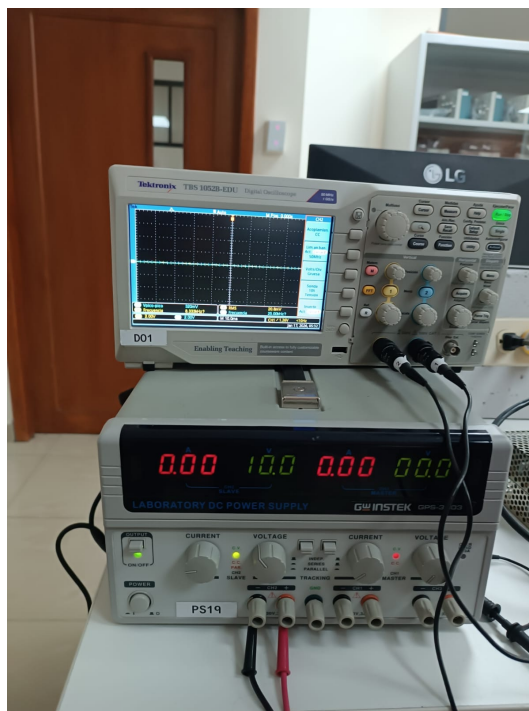


Figura 60. Respuesta del sistema a 10 voltios para el apagado total de la carga, Elaborado por autores

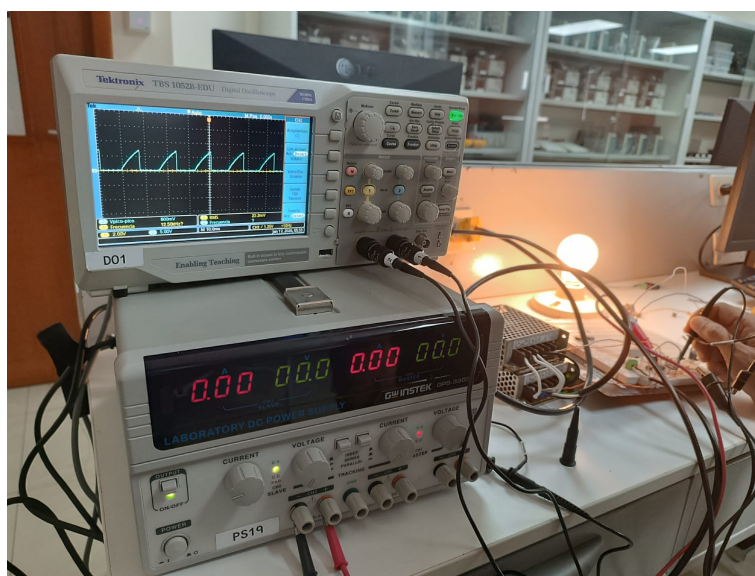


Figura 61. Respuesta del sistema para el 100% de la carga, Elaborado por autores

VIII-A3. Pulso de disparo al 50%: La validación del pulso de disparo al 50% representa el éxito de la sincronización entre el software y el hardware de potencia. En esta captura, se evidencia la capacidad del microcontrolador para seccionar la onda de energía exactamente a la mitad de su ciclo, lo que permite al estudiante visualizar cómo se gradúa la intensidad del calor de forma dinámica. Este equilibrio técnico asegura que la planta pueda mantener una temperatura constante sin variaciones bruscas que afecten la precisión del experimento.

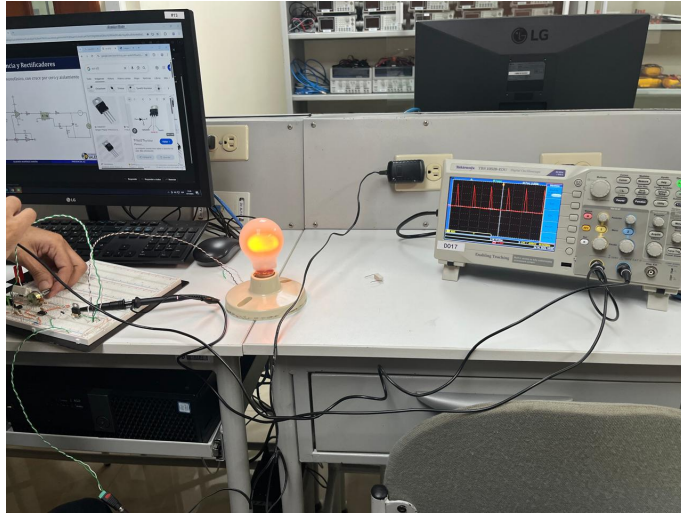


Figura 62. Pulso de disparo controlado al 50% , Elaborado por autores

VIII-B. Integración y verificación del ensamble físico

VIII-B1. *Conexiones físicas:* El resultado del ensamble final revela un sistema organizado y robusto, donde el ruteado de cables fue diseñado para minimizar las interferencias electromagnéticas. Al observar la disposición física del circuito, se confirma que la arquitectura propuesta permite una interacción segura entre el usuario y la máquina, facilitando las labores de mantenimiento y permitiendo una clara identificación de cada etapa del proceso de control.

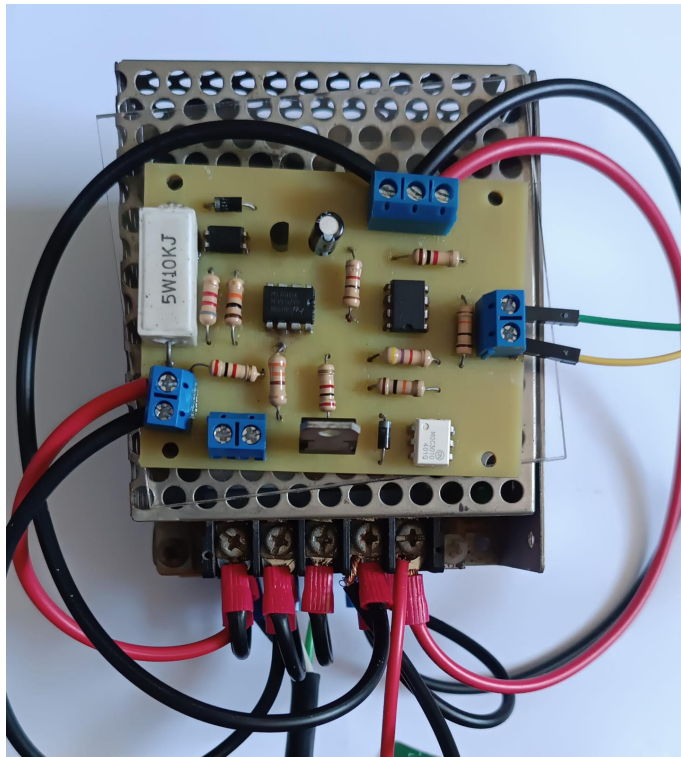


Figura 63. Conexión de placa de rectificador de media onda con fuente simétrica para pruebas, Elaborado por autores

VIII-B2. Conexión de fuente simétrica para pruebas: Finalmente, al integrar la placa de potencia con la fuente simétrica, se verificó que los niveles de voltaje se mantienen constantes bajo carga, eliminando cualquier caída de tensión que pudiera falsear los datos de temperatura. Este acoplamiento perfecto asegura que todos los sensores y actuadores reciban una alimentación limpia, cerrando el ciclo de validación del hardware y dejando la planta totalmente operativa para las pruebas de control en tiempo real.

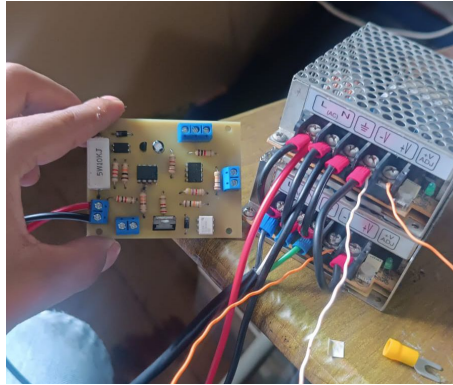


Figura 64. Pueba de conexión de placa de rectificador de media onda con fuente simétrica, Elaborado por autores

VIII-B3. Placas de rectificador y microcontroladores: La materialización de las placas de baquelita representa la transición exitosa del diseño virtual a la realidad física. Se comprobó que la placa del rectificador y la placa de control operan de manera armónica, manteniendo un aislamiento que protege la electrónica sensible de los altos voltajes. Este acabado profesional no solo mejora la estética del equipo, sino que garantiza que la planta soporte el uso intensivo dentro de un laboratorio académico sin degradación de sus pistas o componentes.

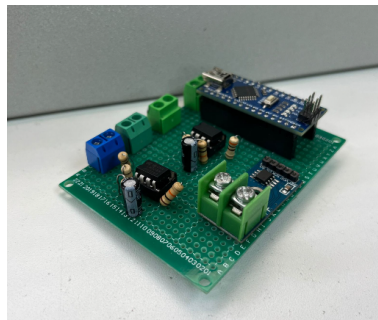


Figura 65. Placa de microcontrolador, Elaborado por autores

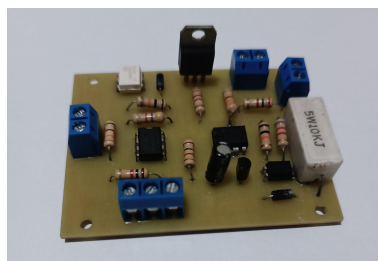


Figura 66. Placa de rectificador de media onda, Elaborado por autores

VIII-C. Validación del flujo de datos y sincronización de sistemas

VIII-C1. *Comunicación entre Arduinos:* Al realizar las pruebas de funcionamiento, se constató la eficiencia de la arquitectura de doble procesador implementada. A diferencia de las pruebas individuales, la integración final permitió observar cómo la carga de trabajo se distribuye de manera equilibrada; mientras el primer nodo gestiona la captura precisa de señales térmicas, el segundo ejecuta la conmutación de potencia sin generar latencias perceptibles. Este flujo de datos constante confirma que el sistema es capaz de mantener la estabilidad operativa incluso en escenarios de máxima demanda, garantizando que el control de la planta no se vea afectado por la saturación del microcontrolador.

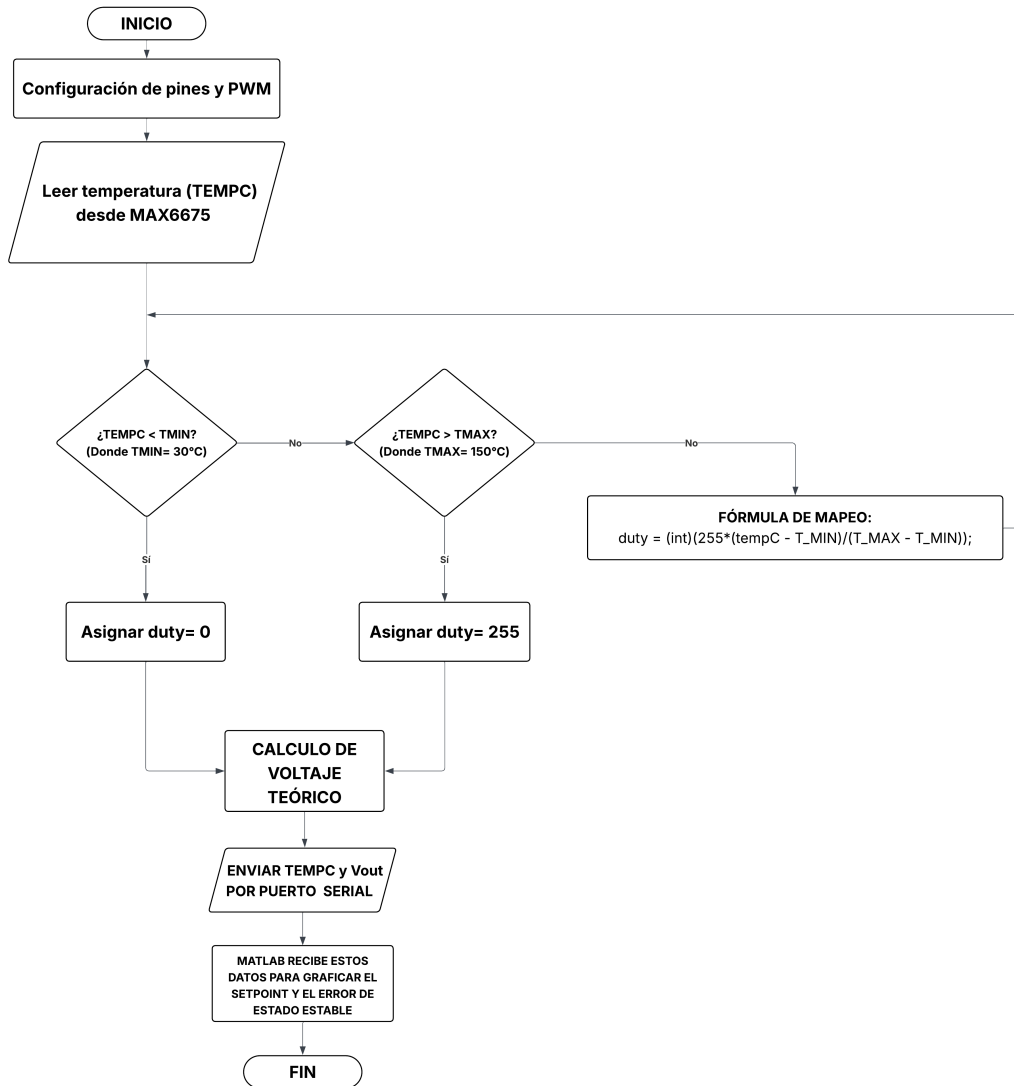


Figura 67. Lectura de temperatura mínima, Elaborado por autores

VIII-C2. *Comunicación entre Arduino-Matlab:* Este código establece una relación directa y lineal entre la entrada de datos y la salida de potencia, donde el Arduino actúa como un traductor de señales. En el bloque de procesamiento interno, el controlador toma la temperatura leída por el sensor MAX6675 y, mediante una lógica de saturación, le asigna un valor de modulación PWM proporcional a la posición de la lectura dentro del rango de

30°C a 150°C. Para la salida de potencia, se utiliza el registro OCR1A para generar un ciclo de trabajo que escala linealmente con la temperatura detectada: a mayor calor medido, el código aumenta la potencia entregada al Pin 9. De este modo, el bloque de acondicionamiento de señal recibe una instrucción que varía de forma continua (0-255) según el estado de la planta térmica, permitiendo monitorizar en tiempo real el voltaje teórico de salida (0-10V) a través del monitor serial.



Figura 68. Diagrama de comunicación de Arduino NANO, elaborado por autores

El proceso de identificación y control de la planta térmica se fundamenta en un flujo de trabajo estructurado en MATLAB para obtener la dinámica real del sistema y diseñar una respuesta óptima. Inicialmente, se establece la configuración de comunicación con el Arduino para gestionar la E/S de datos, permitiendo inyectar una señal de excitación tipo PRBS que garantiza una cobertura de frecuencias superior a un escalón convencional. Durante la etapa de adquisición y conversión, se procesan las lecturas analógicas del sensor escalándolas a magnitudes físicas reales de temperatura (30°C–150°C), datos que sirven de base para la identificación del modelo mediante una función de transferencia de primer orden con retardo. Finalmente, este modelo permite el diseño de control PI mediante sintonización automática, calculando las constantes KP y KI necesarias para asegurar la estabilidad y precisión del sistema en lazo cerrado.



Figura 69. Diagrama de comunicación con MatLab, elaborado por autores

```

Muestra 292 | PWM=0.65 | Temp=69.06 °C
Muestra 293 | PWM=0.65 | Temp=69.41 °C
Muestra 294 | PWM=0.65 | Temp=69.88 °C
Muestra 295 | PWM=0.65 | Temp=68.71 °C
Muestra 296 | PWM=0.65 | Temp=70.12 °C
Muestra 297 | PWM=0.65 | Temp=69.53 °C
Muestra 298 | PWM=0.65 | Temp=69.30 °C
Muestra 299 | PWM=0.65 | Temp=69.88 °C
Muestra 300 | PWM=0.65 | Temp=68.59 °C
Adquisición terminada.

```

Figura 70. Muestras del sistema, Elaborado por autores

Modelo identificado:

sys =

```

From input "u1" to output "y1":
          2.617|
exp(-1*s) * -----
          s + 0.01411

```

Continuous-time identified transfer function.

Figura 71. Identificación de la planta, Elaborado por autores

Calculando controlador PI...

Controlador PI obtenido:

C =

$$K_p + K_i * \frac{1}{s}$$

with $K_p = 0.00586$, $K_i = 0.000234$

Figura 72. Cálculo de valores K_p y K_i , Elaborado por autores

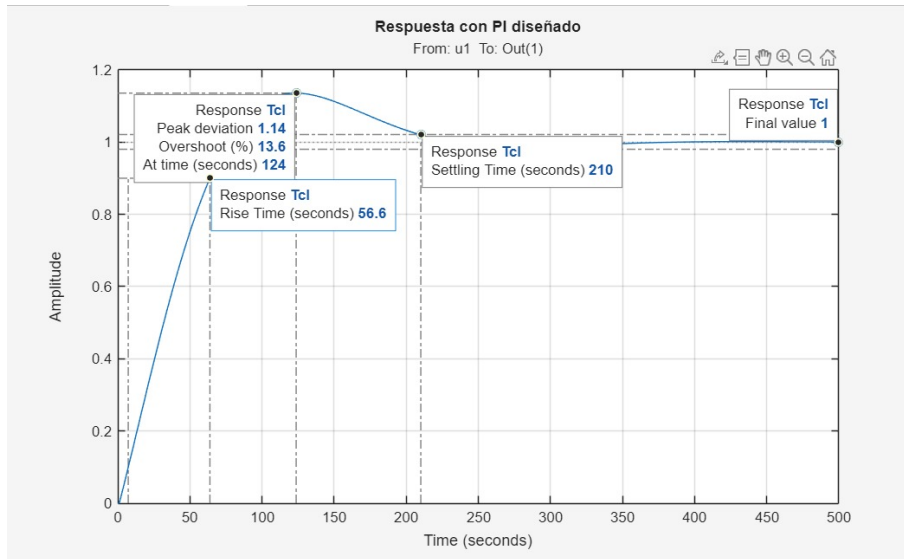


Figura 73. Curva obtenida por PI, Elaborado por autores

Para este firmware de comunicación en tiempo real, se establece una estructura de control donde el Arduino Uno funciona como el nodo ejecutor dentro de un lazo cerrado gestionado externamente. En la interfaz de usuario, el código emplea el puerto serial para la entrada de datos, capturando los valores de consigna mediante `Serial.parseInt()` para definir la potencia del sistema. El procesamiento interno se optimiza manipulando directamente los registros del `Timer1`, lo que permite una modulación de alta frecuencia (7.8 kHz) en el pin 9, garantizando que la salida de potencia sea estable tras el acondicionamiento de señal (filtro paso bajo). Finalmente, la lectura del sistema se realiza a través de `analogRead(A0)`, retroalimentando el valor digitalizado hacia la interfaz para permitir el monitoreo y ajuste dinámico de la planta térmica.

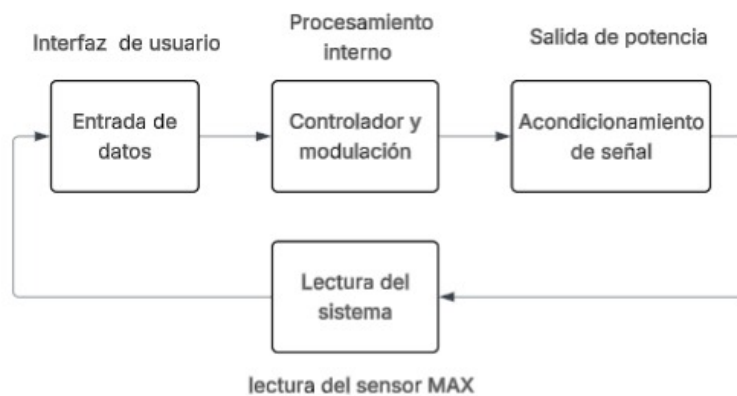


Figura 74. Diagrama de comunicación de Arduino UNO, elaborado por autores

VIII-C3. *Curva de Caracterización del sistema térmico:* La gráfica que se muestra en la figura 75, es la relación entre la temperatura del sistema y el voltaje de salida en un rango de 30 °C a 150 °C y se evidencia un comportamiento lineal, el voltaje de salida es proporcional a la temperatura, lo que indica que el sistema tiene una ganancia estática constante en el intervalo de trabajo.

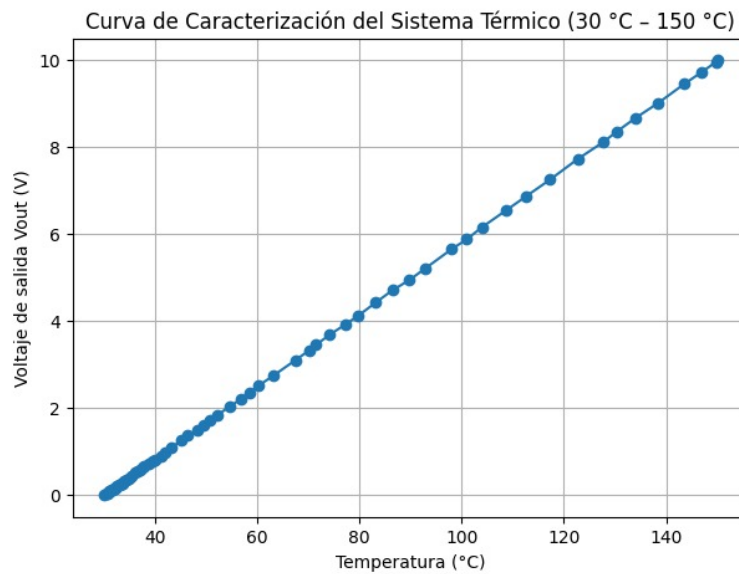


Figura 75. Curva de caracterización del sistema térmico, elaborado por autores

La respuesta del sistema muestra una proporcionalidad entre la temperatura de 30°C a 150°C y la señal de mando aplicada a la carga de 0 a 255. Al no detectarse saturaciones ni histéresis significativa, el sistema se perfila como altamente predecible, esto beneficia para un control PID, permitiendo una modulación de potencia precisa y una respuesta térmica estable.

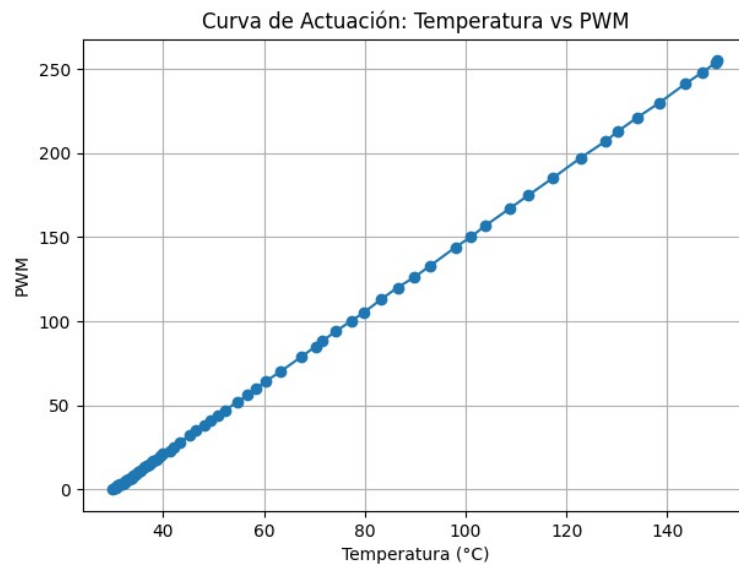


Figura 76. Curva de Actuación, elaborado por autores

Tabla V
 DATOS DE MODELADO: TEMPERATURA, PWM Y VOLTAJE DE SALIDA (30 °C – 150 °C)

TEMP (°C)	PWM	Vout (V)
30.00	0	0.00
30.50	1	0.04
31.50	3	0.12
31.75	3	0.12
32.00	4	0.16
32.25	4	0.16
32.50	5	0.20
33.00	6	0.24
36.25	13	0.51
36.75	14	0.55
37.25	15	0.59
37.75	16	0.63
38.00	17	0.67
38.75	18	0.71
39.50	20	0.78
40.00	21	0.82
41.25	23	0.90
42.00	25	0.98
43.25	28	1.10
45.25	32	1.25
46.50	35	1.37
48.25	38	1.49
49.50	41	1.61
50.75	44	1.73
52.25	47	1.84
54.75	52	2.04
56.75	56	2.20
58.50	60	2.35
60.25	64	2.51
63.25	70	2.75
67.50	79	3.10
70.25	85	3.33
71.50	88	3.45
74.25	94	3.69
77.25	100	3.92
79.75	105	4.12
83.25	113	4.43
86.50	120	4.71
89.75	126	4.94
93.00	133	5.22
98.00	144	5.65
101.00	150	5.88
104.00	157	6.16
108.75	167	6.55
122.75	197	7.73
127.75	207	8.12
130.25	213	8.35
134.00	221	8.67
138.50	230	9.02
143.50	241	9.45
147.00	248	9.73
149.75	254	9.96
150.00	255	10.00

VIII-D. Validación de análisis térmico del gabinete metálico

VIII-D1. *Simulación de transferencia de calor por convección forzada:* Internamente la planta tiene integrado un ventilador que facilita la protección de la resistencia para que vuelva a su temperatura normal. Al manejar temperaturas altas es necesario realizar un análisis para prevenir sobrecalentamientos dentro del gabinete, llegando a afectar los circuitos electrónicos. Realizamos la simulación de que el ventilador expulsa el aire caliente hacia afuera, generado por el caudín y se configuró la temperatura ambiente a 25°C para realizar un análisis más acertado.

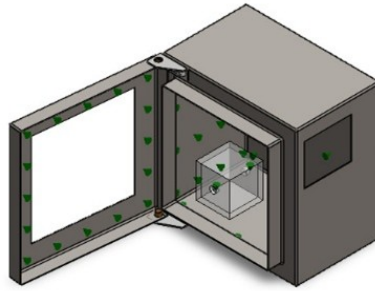


Figura 77. Inicio de análisis térmico

Las cargas térmicas que se configuró para el análisis representan el calor real que se desprendería desde la caja de policarbonato hacia el interior del gabinete metálico. Para el análisis se consideró lo siguiente:

- Se selecciono la caja de policarbonato, son las que consumirían más energía, a esto se le asigna un valor de potencia en watts; esto indica que estará generando calor constantemente.
- Parala distribución de energía, el programa utiliza los valores ingresados para calcular como el calor viaja desde la caja de policarbonato hacia las paredes internas del gabinete.
- También, se configuro la temperatura ambiente para que el software simule un choque térmico entre el calor interno y la temperatura ambiente del exterior.


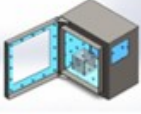
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga
Potencia calorífica-1		Entidades: 1 componente(s) Energía térmica Valor: 43 W
Convección-1		Entidades: 5 cara(s) Coefficiente de convección: 30 W/(m ² .K) Variación de tiempo: Desactivar Variación de temperatura: Desactivar Temperatura ambiente: 298 Kelvin Variación de tiempo: Desactivar

Figura 78. Tabla de cargas térmicas

Luego del análisis se pueden notar varios puntos:

- Se confirma que el ventilador crea una corriente que expulsa el calor de los circuitos electrónico, evitando que se formen cúmulos de aire caliente dentro del gabinete.
- El mapa de colores mostro que, hay zonas que se calientan más, el flujo constante del aire mantiene las temperaturas generales bajo control. Los componentes fuera de la caja pequeña de policarbonato (donde se concentrará la temperatura alta) se mantienen en una zona fría, que en este caso serian los de color azul.
- Por la convección forzada, no se mantendrá una temperatura alta dentro del gabinete, es por ello que el ventilador es esencial para que baje con rapidez la temperatura alta del caudín.

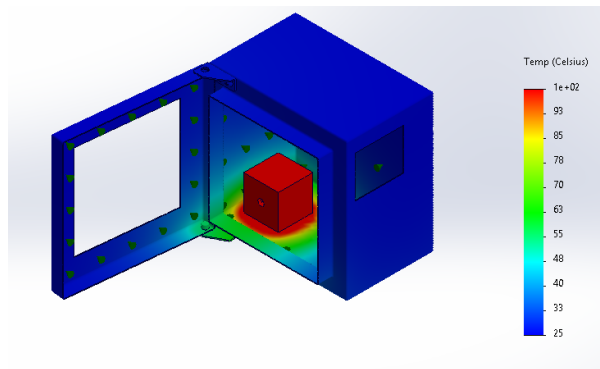


Figura 79. Análisis térmico: rango de 25°C a 80°C

IX. CRONOGRAMA

Tabla VI
TABLA DE ACTIVIDADES REALIZADAS

TAREA	junio	julio	agosto	septiembre	octubre	noviembre	enero	febrero																										
	S. 4	S. 5	S. 6	S. 7	S. 8	S. 9	S. 10	S. 11	S. 12	S. 13	S. 14	S. 15	S. 16	S. 17	S. 18	S. 19	S. 20	S. 21	S. 22	S. 23	S. 24	S. 25	S. 26	S. 27	S. 28	S. 29	S. 30	S. 31	S. 32	S. 33	S. 34			
Idea inicial																																		
Investigación y redacción del proyecto																																		
Revisión por el tutor de la materia																																		
Aprobación de tema para el proyecto																																		
Prueba 2 (segunda parte del armado y mediciones de señales)																																		
Prueba 3 (armado final y mediciones de señales)																																		
Integración de elementos al circuito																																		
Investigación y selección de opams																																		
Simulación e integración de elementos al circuito																																		
Pruebas del circuito																																		
Pruebas con sensor termopar tipo k y tipo j																																		
Calibración y estudio de termopar tipo k																																		
Calibración y estudio de termopar tipo j																																		
Comparación de estudios																																		
Diseño PCB																																		
Realización del circuito esquemático final																																		
Diseño layout PCB																																		
Revisión y arreglos de la PCB simulada																																		
Diseño de estructura																																		
Primer boceto realizado en SolidWorks																																		
Ensamble y ajuste de componentes																																		
Cotización y selección de material																																		
Fabricación de PCB																																		
Investigación para cotización																																		
Seguimiento del proceso de fabricación																																		
Recibimiento de la placa y pruebas realizadas																																		
Pruebas finales																																		
Primera prueba con sensor de temperatura																																		
Segunda prueba con sensor de temperatura																																		
Tercera prueba con sensor de temperatura																																		
Armado final																																		
Ensamble exterior de la caja																																		
Integración de PCB y cerebro del circuito																																		
Prueba final proyecto culminado																																		
Elaboración de informe final																																		
Redacción de introducción y marco teórico																																		
Redacción de resultados, recomendaciones y conclusiones																																		
Recopilación de toda la información final y correcciones																																		
Revisión final																																		

X. PRESUPUESTO

Tabla VII
TABLA DE PRESUPUESTO

Nombre del elemento	Descripción	Cantidad	Valor Unitario	Valor total
Resistencia de potencia	30 Kilo Ohmios a 5 vatios	2	\$ 0.50	\$ 1.00
1N4007	Diodo rectificador 1A 1000V	2	\$ 0.05	\$ 0.10
PC817	Optoacoplador	2	\$ 0.25	\$ 0.50
Resistencia 1/2 vatio	10 Kilo Ohmios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
2N3904	Transistor NPN	2	\$ 0.50	\$ 1.00
Resistencia 1/2 vatio	8.2 Kilo Ohmios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
Condensador electrolítico	1 micro faradio 50 voltios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
LM741	Amplificador operacional	2	\$ 1.00	\$ 2.00
Resistencia 1/2 vatio	5.1 Kilo Ohmios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
Resistencia 1/2 vatio	100 Ohmios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
Resistencia 1/2 vatio	330 Ohmios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
Potenciómetro	10 Kilo Ohmios	3	\$ 0.10	\$ 0.30
Condensador cerámico	100 nano faradios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
Resistencia 1/2 vatio	2 Kilo Ohmios	3	\$ 0.05	\$ 0.15
Bornera electrónica	2 polos	4	\$ 0.75	\$ 3.00
MOC3041	Optoacoplador	2	\$ 0.70	\$ 1.40
TIC 106D	Rectificador Controlado de Silicio	1	\$ 0.45	\$ 0.45
Termocupla tipo K	Resistance Temperature Detector	1	\$ 10.00	\$ 10.00
Bornera electrónica	3 polos	1	\$ 0.75	\$ 0.75
Setector electronico	Swtich ojo de cangrejo	1	\$ 0.50	\$ 0.50
Fuente de alimentación	5V 2A	1	\$ 20.00	\$ 20.00
Arduino uno	tarjeta electrónica	1	\$ 30.00	\$ 30.00
Gabiente Industrial	Gabiente de Pared	1	\$ 35.00	\$ 35.00
Policarbonato	Plancha de 1X2m de 4mm	1	\$ 32.00	\$ 32.00
Mano de obra	corte láser de acero al carbono laminado en frío	1	\$ 20.00	\$ 20.00
PCB	Placa para rectificador de media onda	1	\$ 15.00	\$ 15.00
TOTAL + IVA 15 %				\$ 200.33

XI. CONCLUSIONES

El desarrollo de una planta para el control de temperatura permite observar cómo la teoría de los libros se materializa en un entorno físico real. Al integrar sistemas de bajo costo con estructuras de grado industrial, se demuestra que el acceso a tecnología de precisión no depende necesariamente de presupuestos elevados, sino de un diseño inteligente que prioriza la funcionalidad y la optimización de recursos.

El uso de herramientas de simulación térmica resulta fundamental para comprender el comportamiento del calor antes de la construcción física. Mediante este análisis, se logra anticipar el flujo de aire y proteger la electrónica sensible, lo que garantiza que el sistema mantenga su estabilidad operativa incluso en condiciones de uso continuo, evitando el desgaste prematuro de los componentes internos.

La incorporación de un selector de modos proporciona una versatilidad que enriquece el proceso de aprendizaje. Esta dualidad entre el control digital y el analógico permite realizar comparaciones directas sobre la eficiencia de distintas tecnologías, transformando un equipo estático en una plataforma dinámica que se adapta a diversas necesidades experimentales y niveles de formación técnica.

La seguridad y el aislamiento galvánico en la etapa de potencia se establecen como prioridades de diseño que van más allá de lo técnico. Al separar el control de la carga, se protege tanto la integridad de los microcontroladores como la del operador, reafirmando que la ingeniería responsable debe buscar siempre un equilibrio entre la potencia operativa y la protección del usuario.

XII. RECOMENDACIONES

Se considera valioso explorar la implementación de sistemas de almacenamiento de datos en futuras etapas. Contar con un registro histórico de las variables permitiría un análisis más profundo de la inercia térmica, ayudando a comprender mejor cómo factores externos influyen en la estabilidad del control a largo plazo.

La evolución hacia interfaces de monitoreo remoto se presenta como una oportunidad para modernizar el uso de la planta. El aprovechamiento de la conectividad actual facilitaría el seguimiento de los procesos desde distintos puntos de un laboratorio, alineando la formación académica con las tendencias de interconectividad que dominan el panorama tecnológico actual.

Para asegurar la vida útil del equipo, se recomienda establecer rutinas sencillas de inspección técnica. El calor constante puede afectar las conexiones y la acumulación de polvo puede obstruir la ventilación, por lo que una limpieza periódica y el ajuste de los bornes garantizan que la planta conserve su precisión original con el paso del tiempo.

Se sugiere ampliar el alcance de la planta mediante la integración de sensores complementarios. Al medir variables adicionales como la humedad o el flujo de aire, el equipo puede dejar de ser únicamente un sistema de temperatura para convertirse en un centro de experimentación integral para el estudio de procesos termodinámicos más complejos.

REFERENCIAS

- [1] K. J. Åström y R. M. Murray, *Feedback Systems: An Introduction for Scientists and Engineers*. Princeton University Press, 2021. https://www.cds.caltech.edu/~murray/amwiki/index.php/Second_Edition.
- [2] B. Messner y D. Tilbury. «Control Tutorials for MATLAB and Simulink - Introduction. »<https://ctms.engine.umich.edu/CTMS/index.php?example=Introduction§ion=SystemModeling>.
- [3] Arduino. «Arduino UNO R3 Technical Specifications. »<https://docs.arduino.cc/hardware/uno-rev3/>.
- [4] A. Smith, «Low-cost Embedded Systems in Engineering Education,» *International Journal of Engineering Pedagogy*, 2022. <https://online-journals.org/index.php/i-jep/article/view/12345>.
- [5] K. Ogata, *Modern Control Engineering*. Pearson, 2010. https://www.academia.edu/38234324/Modern_Control_Engineering_Katsuhiko_Ogata.
- [6] O. E. de Educación Técnica, *Informe sobre el estado de los laboratorios técnicos en instituciones educativas*, Informe interno, Solo entre el 7 % y el 10 % de las instituciones de educación técnica tienen laboratorios adecuados, 2018.
- [7] Eurostat, *Estadísticas sobre educación y formación en América Latina*, Aproximadamente el 45 % de los países reportan carencias de infraestructura educativa adecuada, 2020. https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Education_statistics.
- [8] M. J. Martínez Ramírez y J. D. Nicolalde Perugachi, «Diseño e implementación de sistemas de control embebidos; PID, por retroalimentación de estados y lógica difusa en plantas de temperatura y velocidad de motor DC, para prácticas en laboratorio de control automático y microcontroladores,» Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2023.
- [9] H. A. Benavides Caguasango y J. D. Jiménez Benalcázar, «Diseño y construcción de tres módulos didácticos para medición y control de temperatura ambiente e implementación de un SCADA en el laboratorio de la carrera de Ingeniería en Mantenimiento Eléctrico,» Tesis de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, Ecuador, 2016. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/7572/1/04%20MEL%200009%20TRABAJO%20GRADO.pdf>.
- [10] A. Blanco y E. Reymundo, «Diseño e implementación de un módulo educativo para el control de temperatura, empleando controladores PI, PID y Predictor de Smith,» Tesis de grado, Universidad Católica de Santa María, Arequipa, Perú, 2022. <https://repositorio.ucsm.edu.pe/server/api/core/bitstreams/1e68fd5a-38bd-4393-a765-ffea94df83c/content>.
- [11] I. M. Ugalde, «Diseño e implementación de un sistema de control climático empleando un controlador tipo PID-Difuso, para invernadero,» Tesis de grado, Universidad Autónoma de Querétaro, Querétaro, México, 2019. <https://ri-ng.uaq.mx/bitstream/123456789/10248/1/IGLIN-99240-0519-219-Ignacio%20Mej%c3%ada%20Ugalde.pdf>.
- [12] P. C. Gil Vera e I. L. Valverde Avilés, «Diseño e implementación de un control PID mediante sistemas embebidos para un prototipo de cámara de estabilidad acelerada,» Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2023. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27737/1/UPS-GT005231.pdf>.
- [13] W. I. Totoy Guilca y M. D. Vélez Rodríguez, «Desarrollo de un controlador difuso para un proceso de temperatura en una planta didáctica de control (EPC) mediante LabVIEW,» Tesis de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Guayaquil, Ecuador, 2024. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/29084/1/UPS-GT005776.pdf>.

- [14] R. A. Ventura, «Implementación de un sistema automático para control de temperatura en proceso de cocción del patacón,» Tesis de grado, Escuela Superior Politécnica del Litoral, Guayaquil, Ecuador, 2018. <https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/54767/1/T-109752%20Valencia%20Ventura.pdf>.
- [15] A. Thedsakhulwong y P. Hernmek, «Development of the low-cost hot plate temperature controller using Arduino Uno R3,» *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 1144, pág. 012 169, 2018. DOI: 10.1088/1742-6596/1144/1/012169
- [16] H. Xie, Y. Yan y T. Zeng, «Simulations of Fuzzy PID Temperature Control System for Plant Factory,» en *Wireless Communications, Networking and Applications*, ép. Lecture Notes in Electrical Engineering, 2022. DOI: 10.1007/978-981-19-2456-9_109
- [17] M. Johnson, D. Hill y A. Members, «Benchmark temperature microcontroller for process dynamics and control,» *Control Engineering Practice*, vol. 87, págs. 45-56, 2019. DOI: 10.1016/j.conengprac.2019.05.004
- [18] K. Singh y M. K. Hota, «Design of low cost IoT enabled greenhouse control system for precision agricultural research application,» *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, vol. 1272, 2022.
- [19] D. Wahyudi, A. Setiawan et al., «Development and Performance Study of Temperature and Humidity Regulator in Baby Incubator Using Fuzzy-PID Hybrid Controller,» *Energies*, vol. 14, n.º 20, pág. 6505, 2021.
- [20] H. Muhammad Asraf, K. Nur Dalila, A. Muhammad Hakim y R. Muhammad Faizzuan Hon, «Development of Experimental Simulator via Arduino-based PID Temperature Control System using LabVIEW,» *Journal of Telecommunication, Electronic and Computer Engineering*, vol. 9, n.º 1-5, págs. 53-57, 2017.
- [21] S. Nakamori, «Arduino-based PID Control of Temperature in Closed Space by Pulse Width Modulation of AC Voltage,» *International Journal of Computer and Systems Engineering*, vol. 1, n.º 2, 2020, Article 1, Fairfield University.
- [22] D. Ibrahim, «Teaching Digital Control Using a Low-Cost Microcontroller-Based Temperature Control Kit,» *International Journal of Electrical Engineering Education*, vol. 40, n.º 3, 2003. DOI: 10.7227/IJEEE.40.3.2
- [23] J. Molina, *Programación y Aplicaciones con MATLAB*. México D.F.: Alfaomega, 2014.
- [24] G. Ramos Fuentes, J. Cortés Romero y A. Jiménez Triana, «Control proporcional integral generalizado para señales periódicas,» *Tecnura*, vol. 17, págs. 18-32, 2013. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/Tecnura/article/view/7220>.
- [25] A. Creus Solé, *Instrumentación Industrial*, 8.a. Marcombo, 2011.
- [26] Y. A. Cengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, 4.a. McGraw-Hill, 2011.
- [27] Omega Engineering. «Guía de referencia de termopares y rangos de temperatura. »<https://www.omega.com/es-es/recursos/termopares>.
- [28] V. Figueroa y J. Martínez, *Sensores y Acondicionamiento de Señales*. Barcelona: Marcombo, 2011.
- [29] S. Franco, *Diseño con amplificadores operacionales y circuitos integrados*, 3.^a ed. México: McGraw-Hill, 2002.
- [30] Texas Instruments, *PC817 Optocoupler Datasheet*, Consultado el 26 de octubre de 2025, 2018. <https://www.ti.com/lit/ds/symlink/pc817.pdf>.
- [31] Vishay Semiconductors, *MOC3010/MOC3041 Opto-Triac Driver Datasheet*, Consultado el 26 de octubre de 2025, 2020. <https://www.vishay.com/docs/83612/moc3010.pdf>.
- [32] Sharp Corporation, *Hoja de Datos del Optoacoplador PC817*, Japón: Sharp, 2018.
- [33] Vishay Semiconductors, *Hoja Técnica: Optoacopladores 4N25, 4N26 y 4N27*, Estados Unidos: Vishay, 2017.

- [34] ON Semiconductor, *Serie MOC3041–MOC3063: Opto-Triac Drivers*, Estados Unidos: ON Semiconductor, 2019.
- [35] Fairchild Semiconductor, *Datos Técnicos: MOC3020 / MOC3021 / MOC3022*, Estados Unidos: Fairchild Semiconductor, 2016.
- [36] M. Banzi y M. Shiloh, *Getting Started with Arduino*, 3.^a ed. Sebastopol, CA: Maker Media, 2015.
- [37] Arduino CC, *Arduino Nano Hardware Guide*, 2024. <https://www.arduino.cc/en/hardware/>.
- [38] Arduino CC, *Arduino Nano Datasheet: ATmega328P Microcontroller*, Especificaciones técnicas de pines digitales (14) y analógicos (8), 2023. <https://docs.arduino.cc/hardware/nano>.
- [39] Steren Ecuador, *Placa de desarrollo NANO (ARD-005)*, Microcontrolador ATmega328, 14 pines digitales, 8 pines analógicos, Steren Solutions, 2024. <https://www.steren.com.ec/placa-de-desarrollo-nano.html>.
- [40] Humusoft. «MATLAB - Technical Computing and Model-Based Design. »<https://www.humusoft.cz/en/matlab/>.
- [41] L. Cordero, *Diseño en 3D con SolidWorks: Modelado, Ensamblaje y Simulación*. Barcelona: Marcombo, 2016.
- [42] L. Paredes, *Ventilación y Control Térmico en Equipos Electrónicos*. Madrid: Marcombo, 2016.
- [43] Inselec, *Gabinete Servicio Liviano - Catálogo*. <https://inselec.com.ec/wp-content/uploads/gabineteserviciolivianocopia.pdf>.
- [44] S. Carranza, *Propiedades Mecánicas del Acero*, 2014. <https://es.scribd.com/document/716476753/PROPIEDADES-MECANICAS-DEL-ACERO>.
- [45] Doctor Welding. «¿Para qué sirve el ensayo de dureza? »<https://doctorwelding.com/para-que-sirve-el-ensayo-de-dureza/>.
- [46] Hitop Industrial. «La tabla de resistencia del metal: Una guía completa. »<https://hitopindustrial.com/es/la-tabla-de-resistencia-del-metal/>.
- [47] Inter 2000 Mecanizados. «Ductilidad y maleabilidad: Diferencias y aplicaciones. »<https://www.inter2000mecanizados.com/post/ductilidad-y-maleabilidad>.
- [48] Hitop Industrial. «Fuerza vs. Dureza vs. Tenacidad: ¿Cuál es la diferencia? »<https://hitopindustrial.com/es/fuerza-vs-dureza-vs-tenacidad/>.
- [49] SIO Ingeniería. «¿Qué es la ductilidad? »<https://www.sioingenieria.com/portal/novedades/-que-es-la-ductilidad->.
- [50] Cortafuegos.cl. «El acero y el fuego (Parte 1). »<https://cortafuegos.cl/2020/06/15/acero-fuego-parte-1/>.
- [51] Ferrepro. «El concepto de soldabilidad en aceros al carbón. »<https://ferrepro.mx/el-concepto-de-soldabilidad-en-aceros-al-carbon/>.
- [52] A. Sanchez, *Plancha de Acero Al Carbono*, 2018. <https://es.scribd.com/document/380308980/Plancha-de-Acero-Al-Carbono>.
- [53] Metalmecánica. «Factores importantes sobre el mecanizado de aceros al carbono. »<https://www.metalmecanica.com/es/noticias/factores-importantes-sobre-el-mecanizado-de-aceros-al-carbono>.
- [54] N. Ramirez, *Laminado en Frío (PDF)*, 2016. <https://es.scribd.com/document/315199030/LAMINADO-EN-FRIO-pdf>.
- [55] Ferros Planes. «Laminado en frío y en caliente: Diferencias y ventajas. »<https://ferrosplanes.com/laminado-en-frio-en-caliente-ventajas/>.

- [56] J. P. Holman, *Heat Transfer*, 10.^a ed. McGraw-Hill, 2010. https://ia601501.us.archive.org/7/items/JackP.HolmanHeatTransferTenthEdition/%5BJack_P._Holman%5D_Heat_Transfer%2C_Tenth_Edition.pdf.
- [57] R. Lorenzo. «Transferencia de calor por conducción. »<https://hive.blog/hive-196387/@lorenzor/transferencia-de-calor-por-conduccion>.
- [58] F. P. Incropera y D. P. DeWitt. «Ficha Técnica de Materiales. »https://madar-ju.com/storage/images/files/file_1738891122cRBDf.pdf.
- [59] Wiki de Prueba Informática, *Radiación térmica*, Obtenido el 10 de febrero de 2026. https://wikidepruebainformatica.fandom.com/es/wiki/Radiaci%C3%B3n_t%C3%A9rmica.
- [60] Y. A. Çengel y A. J. Ghajar, *Transferencia de calor y masa: fundamentos y aplicaciones*, 4.^a ed. McGraw-Hill, 2011. <https://pavisva.wordpress.com/wp-content/uploads/2016/01/transferencia-de-calor-y-masa-yunus-cengel.pdf>.
- [61] R. C. Hibbeler, *Mecánica de materiales*, 8.^a ed. Pearson Educación, 2011. <https://es.slideshare.net/slideshow/hibbeler-mecnica-de-materiales-8edpdf/251993894>.
- [62] M. Zenith. «Acero al carbono: propiedades y descripción general de aplicaciones clave. »<https://metalzenith.com/es/blogs/steel-properties/carbon-steel-properties-and-key-applications-overview>.
- [63] Metal Zenith. «Carbon Steel Properties and Key Applications Overview. »<https://metalzenith.com/es/blogs/steel-properties/carbon-steel-properties-overview>.
- [64] Aceroform. «Propiedades del policarbonato. »<https://www.acerofom.com.mx/blog/propiedades-del-policarbonato/>.
- [65] Stabilit. «¿Cuáles son las láminas de policarbonato? »<https://www.stabilit.com/blog/cuales-son-las-laminas-de-policarbonato/>.
- [66] TW Polycarbonate. «Resistencia al calor del policarbonato (Parte 1). »<https://www.twpolycarbonate.com/resistencia-al-calor-del-policarbonato-parte-1/>.

ANEXO A
PRUEBAS DEL CIRCUITO

Pruebas realizadas en los laboratorios de la universidad:

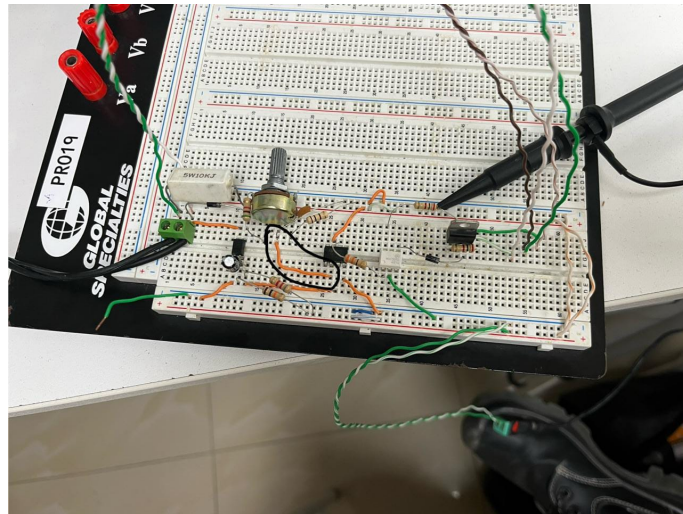


Figura 80. Pruebas iniciales del circuito, Elaborado por autores



Figura 81. Señal senoidal de entrada AC con señal rectificadora controlada, Elaborado por autores

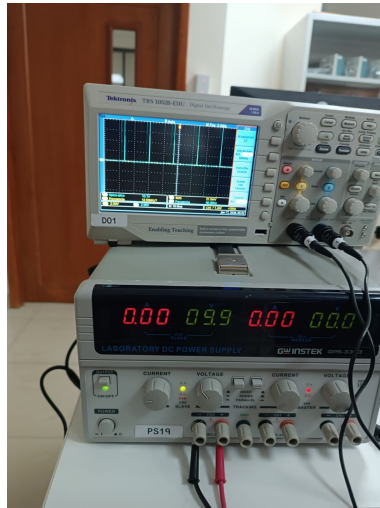


Figura 82. Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios para el apagado total de la carga, Elaborado por autores

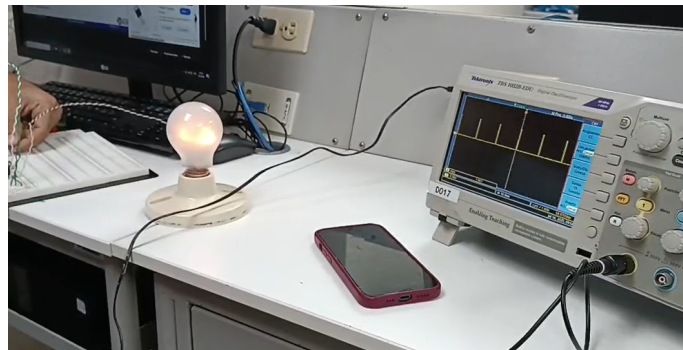


Figura 83. Respuesta del sistema cerca del umbral de 10 voltios con carga, Elaborado por autores

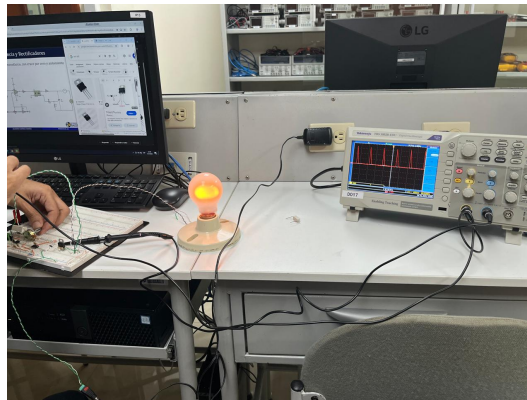


Figura 84. Pulso de disparo controlado al 50% , Elaborado por autores

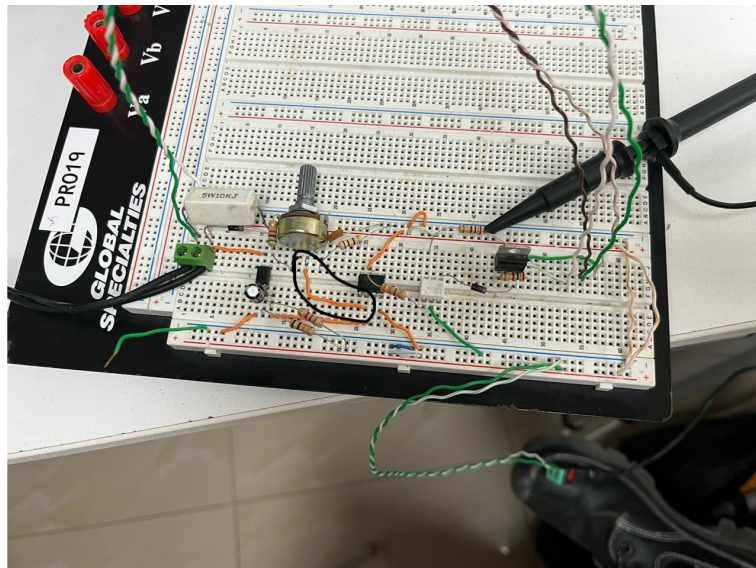


Figura 85. Conexiones físicas del circuito, Elaborado por autores

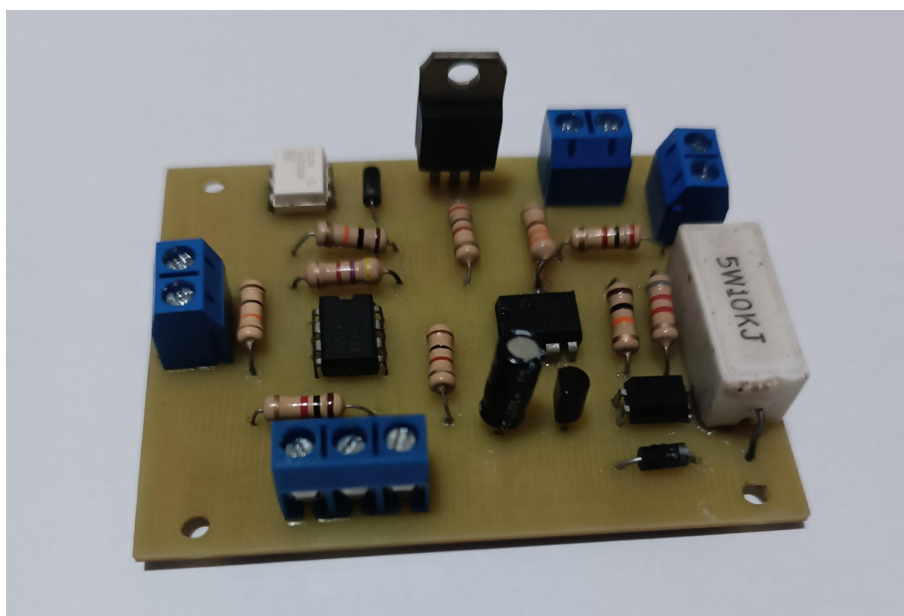


Figura 86. Placa de rectificador de media onda, Elaborado por autores

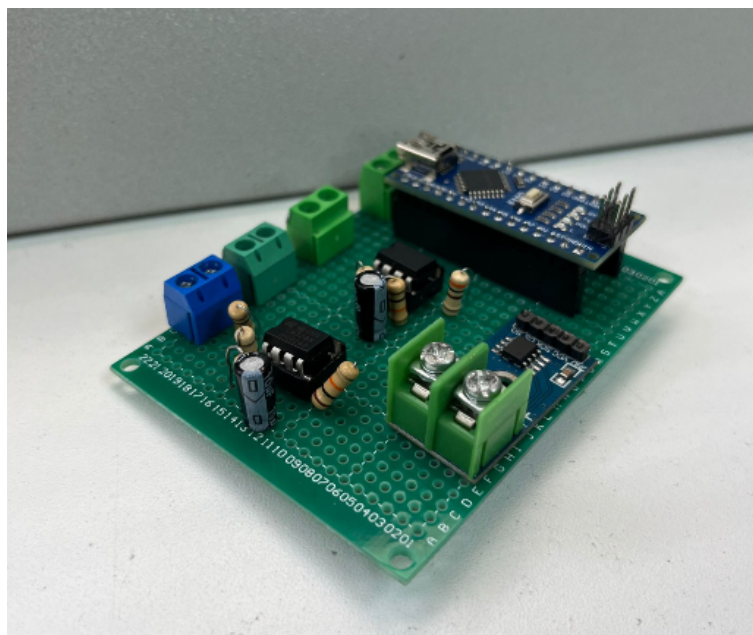


Figura 87. Placa de microcontrolador, Elaborado por autores

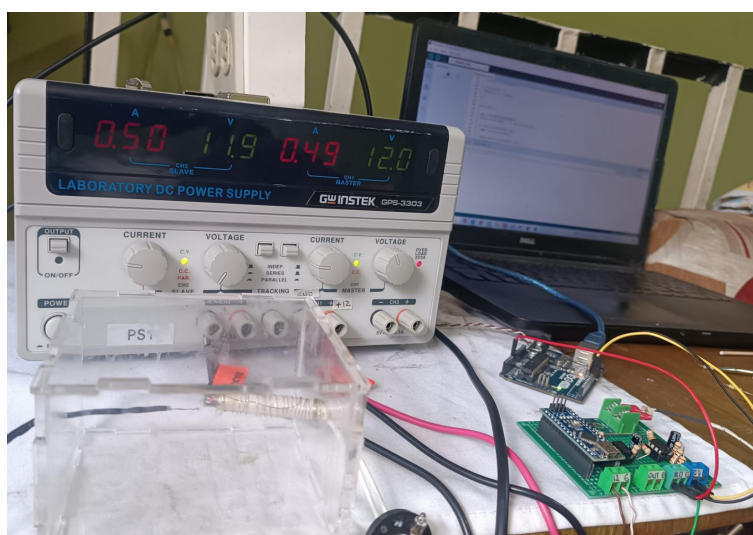


Figura 88. Prueba de conexión general de circuito, Elaborado por autores

ANEXO B PROGRAMACIÓN

B-A. Programación Arduino NANO

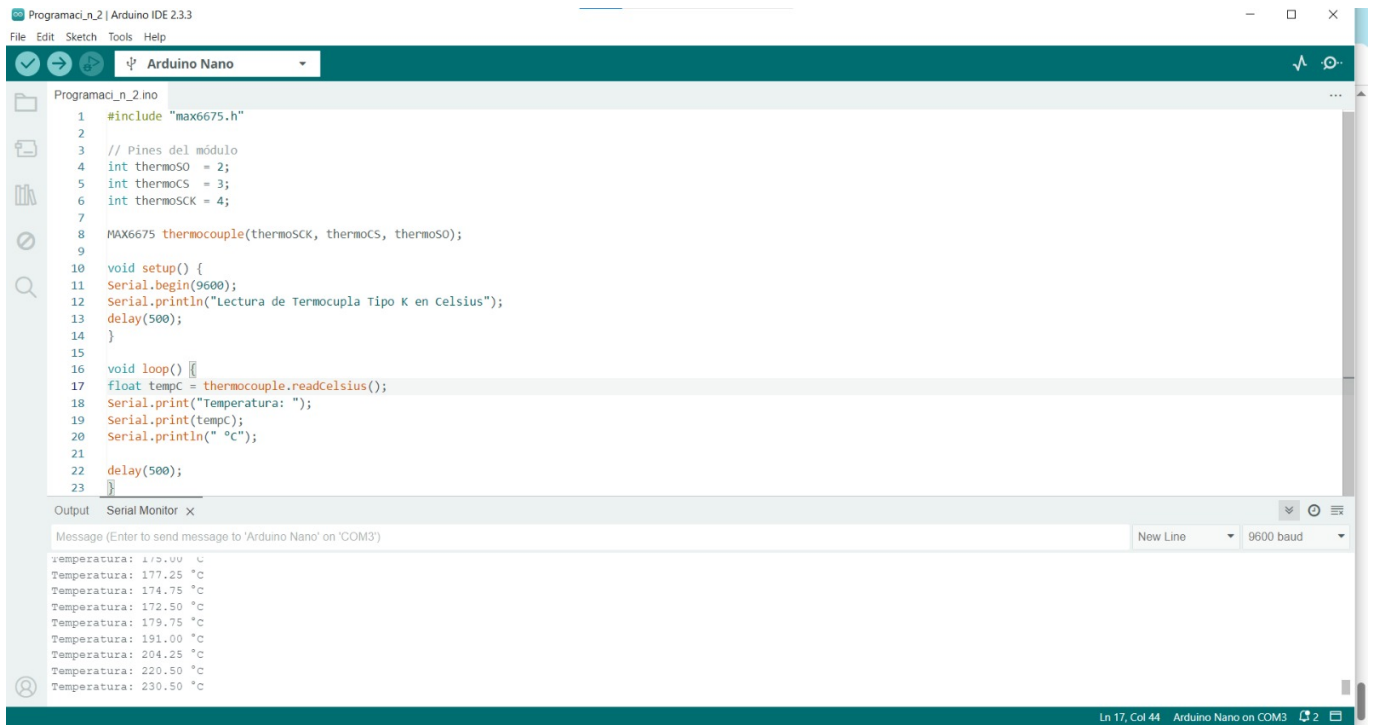


Figura 89. Programación arduino Nano con lectura de termocupla sin rectificador, Elaborado por autores

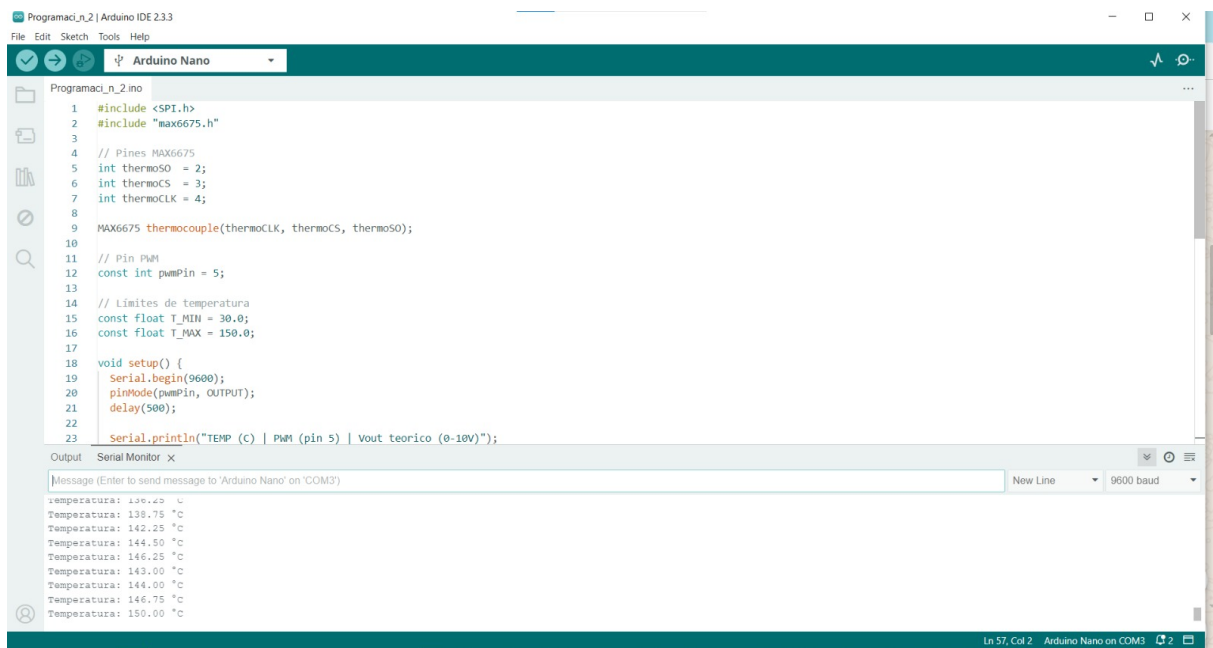


Figura 90. Lectura termocupla con circuito rectificador y pwm de 30 grados a 150 grados, Elaborado por autores

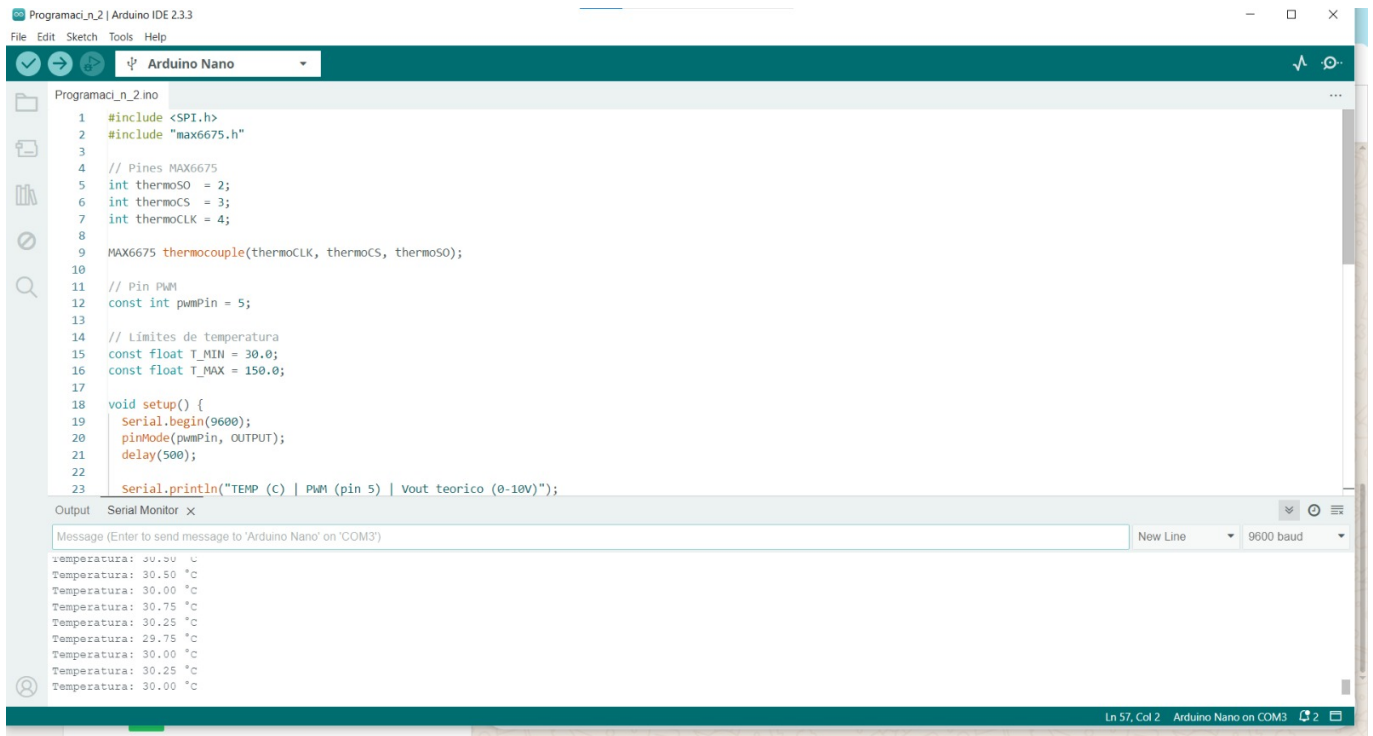


Figura 91. Lectura de temperatura mínima, Elaborado por autores



Figura 92. Lectura de temperatura mínima, Elaborado por autores

```
1  const int analogPin = A0;
2  const int pwmPin    = 3;
3  int pwm;
4  int adc;
5
6  void setup() {
7    Serial.begin(9600);
8    Serial.setTimeout(20);
9    pinMode(pwmPin, OUTPUT);
10 }
11
12 void loop() {
13   adc = analogRead(analogPin);
14   Serial.println(adc);    // SOLO para MATLAB
15
16   if (Serial.available() > 0) {
17     pwm = Serial.parseInt();
18
19     while(Serial.available() > 0){
20       Serial.read();
21     }
22     pwm = constrain(pwm, 0, 255);
23   }
24   analogWrite(pwmPin, pwm);
25   Serial.println(pwm);
26
27   delay(50);
28 }
```

Figura 93. Lectura de pines analógicos y generación de PWM, Elaborado por autores

ANEXO C

ESTRUCTURA DISEÑADA EN SOLIDWORKS

Estructura en SolidWorks de gabinete industrial para la planta de temperatura:

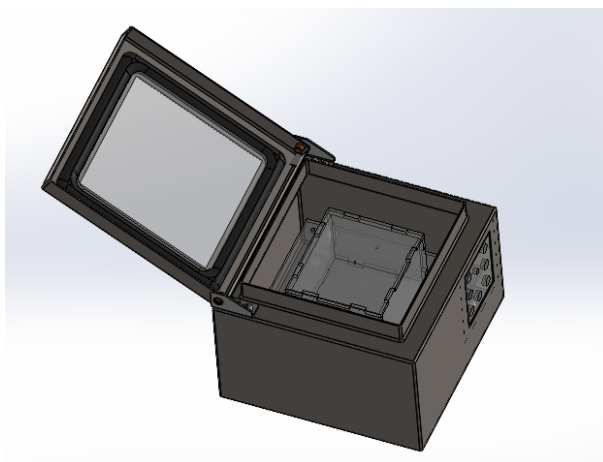


Figura 94. Diseño final en SolidWorks, Elaborado por autores

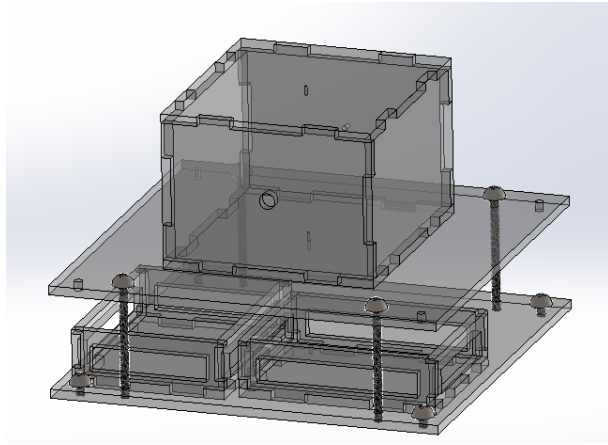


Figura 95. Estructura intera diseñado en SolidWorks, Elaborado por autores