



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE

FACULTAD DE INGENIERÍA Y CIENCIAS APLICADAS

CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

TEMA:

“DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO PARA TRATAMIENTOS
TÉRMICOS SUPERFICIALES CON CONTROL ELECTRÓNICO”

Trabajo de titulación previo a la obtención del título en Ingeniero Automotriz

Línea de investigación: Producción industrial y tecnología sostenible



AUTORES:

RUIZ RUIZ SERGIO ESTEBAN
SUÁREZ TERÁN DORIS LISBETH

DIRECTOR:

MSc. ERIK PAÚL HERNÁNDEZ RUEDA

**Ibarra – Ecuador
2025**



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
BIBLIOTECA UNIVERSITARIA
IDENTIFICACIÓN DE LA OBRA

La Universidad Técnica del Norte dentro del proyecto Repositorio Digital Institucional, determinó la necesidad de disponer de textos completos en formato digital con la finalidad de apoyar los procesos de investigación, docencia y extensión de la Universidad.

Por medio del presente documento dejo sentada mi voluntad de participar en este proyecto, para lo cual pongo a disposición la siguiente información:

DATOS DE CONTACTO			
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	100418323-0	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	RUIZ RUIZ SERGIO ESTEBAN	
DIRECCIÓN:	IBARRA, ECUADOR		
EMAIL:	seruizr@utn.edu.ec sergioruiz199807@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062-611-603	TELF. MOVIL	0998070407
CÉDULA DE IDENTIDAD:	DE	100472427-2	
APELLIDOS Y NOMBRES:	Y	SUÁREZ TERÁN DORIS LISBETH	
DIRECCIÓN:	ATUNTAQUI, ECUADOR		
EMAIL:	dlsuarezt@utn.edu.ec slisbeth238@gmail.com		
TELÉFONO FIJO:	062-620-162	TELF. MOVIL	0979932663

DATOS DE LA OBRA	
TÍTULO:	DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO PARA TRATAMIENTOS TÉRMICOS SUPERFICIALES CON CONTROL ELECTRÓNICO.
AUTOR (ES):	RUIZ RUIZ SERGIO ESTEBAN SUÁREZ TERÁN DORIS LISBETH
FECHA:	29/04/2025
SOLO PARA TRABAJOS DE TITULACIÓN	
CARRERA/PROGRAMA:	<input checked="" type="checkbox"/> GRADO <input type="checkbox"/> POSGRADO
TITULO POR EL QUE OPTA:	INGENIERO AUTOMOTRIZ
DIRECTOR:	MSc. HERNÁNDEZ RUEDA ERIK PAÚL



AUTORIZACIÓN DE USO A FAVOR DE LA UNIVERSIDAD

Nosotros, Ruiz Ruiz Sergio Esteban, con cédula de identidad Nro. 100418323-0 y, Suárez Terán Doris Lisbeth, con cédula de identidad Nro. 100472427-2, en calidad de autores y titulares de los derechos patrimoniales de la obra o trabajo de integración curricular descrito anteriormente, hago entrega del ejemplar respectivo en formato digital y autorizo a la Universidad Técnica del Norte, la publicación de la obra en el Repositorio Digital Institucional y uso del archivo digital en la Biblioteca de la Universidad con fines académicos, para ampliar la disponibilidad del material y como apoyo a la educación, investigación y extensión; en concordancia con la Ley de Educación Superior Artículo 144.

Ibarra, a los 29 días del mes de abril de 2025

LOS AUTORES:

Firma:

Nombre: Ruiz Ruiz Sergio Esteban

Firma:

Nombre: Suárez Terán Doris Lisbeth



CONSTANCIAS

Los autores manifiestan que la obra objeto de la presente autorización es original y se la desarrolló, sin violar derechos de autor de terceros, por lo tanto, la obra es original y que son los titulares de los derechos patrimoniales, por lo que asumen la responsabilidad sobre el contenido de la misma y saldrán en defensa de la Universidad en caso de reclamación por parte de terceros.

Ibarra, a los 29 días, del mes de abril de 2025

LOS AUTORES:

Firma:

Nombre: Ruiz Ruiz Sergio Esteban

Firma:

Nombre: Suárez Terán Doris Lisbeth



CERTIFICACIÓN DEL DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

Ibarra, 29 de abril de 2025

MSc. Erik Paúl Hernández Rueda
DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR

CERTIFICA:

Haber revisado el presente informe final del trabajo de Integración Curricular, el mismo que se ajusta a las normas vigentes de la Universidad Técnica del Norte; en consecuencia, autorizo su presentación para los fines legales pertinentes.

ERIK PAUL
HERNANDEZ
RUEDA

Firmado digitalmente
por ERIK PAUL
HERNANDEZ RUEDA
Fecha: 2025.04.29
14:08:57 -05'00

(f)
MSc. Erik Paúl Hernández Rueda
C.C.: 100297806-0



APROBACIÓN DEL COMITÉ CALIFICADOR

El Comité Calificado del trabajo de Integración Curricular “Diseño y construcción de un horno para tratamientos térmicos superficiales con control electrónico” elaborado por Ruiz Ruiz Sergio Esteban y Suárez Terán Doris Lisbeth, previo a la obtención del título de Ingeniero Automotriz, aprueba el presente informe de investigación en nombre de la Universidad Técnica del Norte:

ERIK PAUL
HERNANDEZ RUEDA

Firmado digitalmente por ERIK
PAUL HERNANDEZ RUEDA
Fecha: 2025.04.29 14:09:23
-05'00'

(f):.....
MSc. Erik Paúl Hernández Rueda
C.C.: 100297806-0



Firmado electrónicamente por:
**LUIS ANDRES GARZON
PEREZ**

Validar Únicamente con FirmaEC

(f):.....
PhD. Luis Andrés Garzón Pérez
C.C.: 100264045-4



DEDICATORIA

Este trabajo de investigación está dedicado con todo mi amor a mis padres, Edgar Ruiz y Patricia Ruiz, quienes han sido el pilar más sólido de mi vida, ofreciéndome su apoyo incondicional, su sabiduría y su ejemplo constante de esfuerzo y dedicación. A mis hermanos, Fernando Ruiz y Valeria Ruiz, por estar siempre presentes, alentándome y celebrando cada pequeño logro conmigo. A mi abuelita, cuyo amor inmenso y oraciones inquebrantables me acompañaron siempre, dándome fuerzas en los momentos más difíciles. Dedico también este logro a mis amigos Paúl Bustamante y Carlos Yandún, quienes, con su amistad sincera, sus consejos y su ejemplo, me inspiraron a seguir creciendo y superándome. Y especialmente a Mireya, quien desde el inicio de mi carrera universitaria ha sido un verdadero apoyo incondicional, impulsándome a no rendirme, a creer en mí mismo y a seguir adelante incluso en los momentos de duda y cansancio.

Sergio Esteban Ruiz Ruiz

A mi querida familia, con quienes he compartido cada paso, sueño y esfuerzo. A mi padre, Fabian Suárez y a mi madre, Aida Terán, pilares de este camino. Gracias a su esfuerzo incansable, sacrificio silencioso y amor incondicional, hoy alcanzo este anhelado logro. Han sido y seguirán siendo el ejemplo de que, con dedicación, trabajo y fe, todo es posible. Cada uno de mis pasos ha estado acompañado de su apoyo, confianza y entrega, forjado los valores que hoy me definen.

A mi hermano, Fabián Suárez, a quien me une un lazo indisoluble de amor y complicidad. Su apoyo silencioso ha sido una fuente de fuerza y esperanza, recordándome que los lazos familiares trascienden cualquier dificultad y se fortalecen con el tiempo. A mi prima, Gisela Gómez, compañera de vida y confidente eterna, con quien comparto sueños y alegrías. Su amistad y lealtad han sido mi refugio e impulso. Nuestra unión, nacida en la infancia, ha crecido firme con los años, y su compañía es un tesoro invaluable. Y a mi adorada Adiee, quien acompañó mis días y noches de estudio. Eres y serás siempre una de las mayores alegrías, tu amor trasciende las palabras y has hecho de cada momento una bendición. Siempre que necesité una mano encontré tu patita. A todos ustedes les dedico este logro con el corazón pleno de gratitud. Este trabajo, más que un título, representa el reflejo de todo lo que hemos construido juntos.

Suárez Terán Doris Lisbeth



AGRADECIMIENTO

A mi familia, a mis queridos padres y hermanos, gracias por su amor incondicional, sus palabras de ánimo, su paciencia infinita y por enseñarme que todo esfuerzo tiene su recompensa. A mi abuelita, que con su ternura y fe constante fue un sostén esencial en mi vida. A mis amigos, gracias por su compañía leal, su apoyo en los momentos más duros y por ser parte de esta historia de esfuerzo y perseverancia. A mi tutor, Paúl Hernández, mi sincero agradecimiento por su valiosa guía, por compartir sus conocimientos con paciencia y respeto. Finalmente, a mi amiga, quien ha sido un verdadero motor de ánimo desde los primeros días de mi carrera, recordándome siempre que los sueños se construyen paso a paso, con perseverancia y fe. Mi eterno agradecimiento por ser un faro en medio de la incertidumbre y una voz de aliento que nunca dejó de creer en mí.

Sergio Esteban Ruiz Ruiz

La culminación de esta tesis representa no solo el cierre de una etapa académica, sino también el resultado de años de esfuerzo, sacrificio y sueños compartidos. Agradezco, en primer lugar, a Dios por la vida de mis padres y por permitirme llegar hasta este momento, por fortalecer mi espíritu en cada etapa del camino y por ser guía constante. Agradezco a la Universidad Técnica del Norte por brindarme un espacio de crecimiento académico y personal. Extiendo también mi agradecimiento a los docentes de la carrera, quienes, con su conocimiento y compromiso, dejaron una huella imborrable en mi formación. Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia; les debo todo lo que soy y todo lo que he logrado, gracias a su respaldo incondicional, su apoyo firme y su aliento a lo largo de este proceso. Gracias por ser mi sustento en los momentos de dificultad, mi inspiración y mi fortaleza en la incertidumbre. Cada paso dado ha sido posible gracias a ustedes, a su confianza y a los valores que sembraron en mí, impulsándome siempre a no rendirme y a seguir adelante. Finalmente, deseo expresar mi agradecimiento a Daniel, quien supo acompañarme con paciencia y cariño en los momentos más difíciles de este camino. Su apoyo y fe en mis capacidades fueron mi refugio en los días de incertidumbre. Gracias por creer en mí, por brindarme tranquilidad en medio del caos y por ser luz cuando más la necesité. Tu presencia en mi vida es un regalo.

Suárez Terán Doris Lisbeth



RESUMEN EJECUTIVO

La presente investigación se fundamentó en el interés por fortalecer las capacidades técnicas y productivas mediante el diseño y construcción de un horno para tratamientos térmicos superficiales con control electrónico, promoviendo la mejora continua en los procesos de formación e investigación en el área metalúrgica en Ecuador. El objetivo general fue diseñar y construir el horno para asegurar un manejo preciso de los tratamientos térmicos superficiales en materiales metálicos. La metodología contempló la modelación matemática del comportamiento térmico del horno, el diseño estructural del sistema, la selección de elementos calefactores, la implementación de un sistema de control electrónico, y la validación experimental mediante tratamientos térmicos y ensayos de dureza. Los resultados demostraron que el horno puede alcanzar temperaturas de hasta 1200 °C en 30 minutos con una potencia de 7309 W, garantizando estabilidad estructural bajo condiciones operativas exigentes y un control térmico eficiente. Se comprobó su capacidad para realizar procesos como normalizado, temple y revenido, evidenciando cambios consistentes en las propiedades mecánicas de las probetas tratadas. Entre las conclusiones más relevantes se destaca que el horno presenta flexibilidad operativa para adaptarse a diferentes requisitos térmicos, cumple con los estándares de seguridad y eficiencia energética, y constituye una herramienta confiable para experimentación práctica, optimización de procesos y fortalecimiento de la formación técnica especializada en tratamientos térmicos superficiales.

Palabras clave: horno de tratamientos térmicos, control electrónico, materiales metálicos, diseño térmico, ensayos de dureza, optimización de procesos.



ABSTRACT

This research was based on the interest in strengthening technical and productive capacities through the design and construction of a furnace for surface heat treatments with electronic control, promoting continuous improvement in training and research processes in the metallurgical area in Ecuador. The general objective was to design and build the furnace to ensure precise management of heat treatments in metallic materials. The methodology included the mathematical modeling of the furnace's thermal behavior, the structural design of the system, the selection of heating elements, the implementation of an electronic control system, and experimental validation through heat treatments and hardness tests. The results demonstrated that the furnace can reach temperatures up to 1200 °C in 30 minutes with a power of 7309 W, ensuring structural stability under demanding operating conditions and efficient thermal control. Its capacity to perform processes such as normalizing, hardening, and tempering was verified, showing consistent changes in the mechanical properties of the treated specimens. Among the most relevant conclusions, it is highlighted that the furnace presents operational flexibility to adapt to different thermal requirements, complies with safety and energy efficiency standards, and constitutes a reliable tool for practical experimentation, process optimization, and strengthening specialized technical training in surface heat treatments.

Keywords: heat treatment furnace, electronic control, metallic materials, thermal design, hardness tests, process optimization.



LISTA DE SIGLAS

ASTM. American Society for Testing and Materials

AISI. American Iron and Steel Institute

ISO. International Organization for Standardization

PID. Proporcional, Integral y Derivativo

CAD. Computer Aided Design

HRB. Hardness Rockwell B

AWG. American Wire Gauge

SSR. Solid State Relay

LCD. Liquid Crystal Display

LED. Light Emitting Diode



ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	7
AGRADECIMIENTO	8
RESUMEN EJECUTIVO.....	9
ABSTRACT.....	10
CAPÍTULO I	20
1 INTRODUCCIÓN	20
1.1 Problema de Investigación.	20
1.2 Justificación.....	21
1.3 Objetivos	21
1.3.1 Objetivo General.....	21
1.3.2 Objetivos Específicos.....	21
1.4 Alcance.....	22
CAPÍTULO II.....	23
2 MARCO TEÓRICO.....	23
2.1 Horno para Tratamientos Térmicos.....	23
2.1.1 Hornos a Gas.....	23
2.1.2 Hornos de Atmosfera Controlada	24
2.1.3 Hornos Eléctricos.....	24
2.2 Propiedades Técnicas de los Materiales del Horno de Tratamientos Térmicos.....	25
2.2.1 Materiales Refractarios y Aislantes	25
2.2.2 Elementos Calefactores.....	26
2.2.3 Materiales Base para Ensayos y Estructural	26
2.2.4 Componentes del Sistema de Control Electrónico.....	27
2.3 Introducción a los Sistemas de Control de Temperatura.....	28
2.4 Transferencia de Calor en Hornos.....	29
2.4.1 Conducción	29
2.4.2 Convección	30



2.4.3	Radiación	31
2.5	Procesos de Manufactura: Fundamentos de los Tratamientos Térmicos	31
2.6	Introducción a los Tratamientos Térmicos	32
2.6.1	El Acero como Material para Tratamientos Térmicos.....	33
2.6.2	Procesos para un Tratamiento Térmico	35
2.6.3	Clasificación de los Tratamientos Térmicos	35
2.7	Ensayo de dureza Rockwell según la norma ISO 6508	37
CAPÍTULO III.....		40
3	MATERIALES Y MÉTODOS	40
3.1	Materiales	40
3.1.1	Ladrillo Aislante Liviano de Mullita	40
3.1.2	Ladrillo Refractario con Alto Contenido de Alúmina	41
3.1.3	Mortero Refractario	42
3.1.4	Mantas de Fibras Refractarias Cerámicas	42
3.1.5	Chapa Metálica de Acero Inoxidable.....	43
3.1.6	Resistencia tipo Bobina de Alambre Kanthal A-1	43
3.1.7	Sensor de Temperatura	44
3.1.8	Controlador de Temperatura	44
3.1.9	Relé Sólido de Alta Intensidad	45
3.1.10	Disyuntor tipo Riel.....	45
3.1.11	Interruptor Selector de dos Posiciones	46
3.1.12	Indicador Luminoso	46
3.1.13	Acero ASTM A36.....	47
3.1.14	Cámara Térmica	47
3.1.15	Estereomicroscopio	48
3.1.16	Durómetro para Pruebas Rockwell	48
3.2	Metodología	49
3.2.1	Cálculos de Diseño Térmico	51
3.2.2	Cálculos de Elementos Calefactores	58
3.2.3	Diseño en CAD	61



3.2.4	Construcción del Horno de Tratamientos Térmicos Superficiales	64
3.2.5	Controlador PID.....	65
3.2.6	Diseño del Circuito Electrónico.....	67
3.2.7	Integración del Sistema.....	69
3.2.8	Configuración de Parámetros del Controlador	70
3.2.9	Diseño Experimental.....	72
3.2.10	Preparación y Codificación de Probetas para el Ensayo de Dureza Rockwell ...	74
3.2.11	Ensayo de Dureza según la Norma ISO 6508	76
CAPÍTULO IV.....		78
4	RESULTADOS Y DISCUSIÓN	78
4.1.1	Resultados de los Cálculos de Diseño Térmico	78
4.1.2	Parámetros de Diseño del Horno de Tratamientos Térmicos Superficiales	86
4.1.3	Análisis térmico	87
4.1.4	Modelo Matemático del Controlador PID	89
4.1.5	Gráficas de Funcionamiento	93
4.1.6	Curvas de Desempeño de Normalizado, Temple y Revenido en Probetas.....	97
4.1.7	Comportamiento de la Temperatura frente al Control PID	101
4.1.8	Comportamiento de la Temperatura con Pérdidas de Calor Forzadas.....	102
4.1.9	Verificación de Temperaturas de Trabajo Alcanzadas	103
4.1.10	Impacto de los Tratamientos Térmicos en las Probetas	105
4.1.11	Análisis e Interpretación de los Ensayos de Dureza	106
4.1.12	Evaluación Económica para la Construcción del Horno.....	108
CAPÍTULO V.....		110
Conclusiones y recomendaciones		110
Referencias bibliográficas.....		114
Anexos		120



ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 <i>Escalas Rockwell</i>	38
Tabla 2 <i>Propiedades del ladrillo de mullita</i>	41
Tabla 3 <i>Propiedades del ladrillo de alúmina</i>	41
Tabla 4 <i>Propiedades del mortero refractario</i>	42
Tabla 5 <i>Propiedades de manta cerámica</i>	42
Tabla 6 <i>Propiedades del acero AISI 304</i>	43
Tabla 7 <i>Propiedades resistencia tipo bobina</i>	43
Tabla 8 <i>Propiedades Termocupla tipo K</i>	44
Tabla 9 <i>Propiedades controlador</i>	44
Tabla 10 <i>Especificaciones relé sólido</i>	45
Tabla 11 <i>Propiedades del disyuntor</i>	45
Tabla 12 <i>Propiedades del selector de dos posiciones</i>	46
Tabla 13 <i>Propiedades de la luz piloto</i>	46
Tabla 14 <i>Propiedades del acero ASTM A36</i>	47
Tabla 15 <i>Propiedades de la cámara térmica</i>	48
Tabla 16 <i>Propiedades del estereomicroscopio</i>	48
Tabla 17 <i>Propiedades del durómetro</i>	49
Tabla 18 <i>Simbología para el flujo de calor</i>	51
Tabla 19 <i>Dimensiones del horno</i>	62
Tabla 20 <i>Parámetros de termocupla tipo K</i>	70
Tabla 21 <i>Especificaciones del panel del control</i>	71
Tabla 22 <i>Codificación de probetas</i>	76
Tabla 23 <i>Temperaturas y espesores en el revestimiento del horno</i>	79
Tabla 24 <i>Medidas del horno</i>	80
Tabla 25 <i>Parámetros de diseño</i>	87
Tabla 26 <i>Capacitancias y potencia del sistema</i>	90
Tabla 27 <i>Factor de amortiguamiento y frecuencia natural</i>	91
Tabla 28 <i>Valores de Temperatura-Tiempo para el calentamiento</i>	94
Tabla 29 <i>Valores de Temperatura-Tiempo para el enfriamiento</i>	95
Tabla 30 <i>Valores de Temperatura-Tiempo para el desempeño</i>	96
Tabla 31 <i>Temperaturas en el proceso de temple</i>	104
Tabla 32 <i>Temperaturas en el proceso de revenido</i>	105
Tabla 33 <i>Ensayo de dureza HRB</i>	107
Tabla 34 <i>Costos de los materiales de construcción</i>	109



ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1 <i>Horno a gas Wisconsin Oven</i>	23
Figura 2 <i>Horno eléctrico por inducción.</i>	24
Figura 3 <i>Horno eléctrico por resistencia</i>	25
Figura 4 <i>Esquema de un controlador PID</i>	29
Figura 5 <i>Clasificación de los procesos de manufactura</i>	32
Figura 6 <i>Diagrama de fase Hierro-Carbono</i>	34
Figura 7 <i>Diagrama de Temperatura-Tiempo</i>	35
Figura 8 <i>Diagrama temperatura-tiempo (normalizado)</i>	36
Figura 9 <i>Diagrama temperatura-tiempo (temple)</i>	36
Figura 10 <i>Diagrama temperatura-tiempo (revenido)</i>	37
Figura 11 <i>Ensayo de dureza Rockwell</i>	38
Figura 12 <i>Diagrama de flujo</i>	50
Figura 13 <i>Configuración de las paredes del horno</i>	53
Figura 14 <i>Ensamble del horno para tratamientos térmicos superficiales</i>	62
Figura 15 <i>Geometría fija</i>	63
Figura 16 <i>Cargas externas aplicadas y geometría fija</i>	63
Figura 17 <i>Densidad de malla, cargas externas y geometría fija</i>	64
Figura 18 <i>Hoja de datos del controlador</i>	68
Figura 19 <i>Circuito electrónico del control de temperatura</i>	69
Figura 20 <i>Panel de ilustración</i>	70
Figura 21 <i>Ilustración de temperatura de trabajo</i>	71
Figura 22 <i>Ilustración de Control PID</i>	71
Figura 23 <i>Ilustración de tipo de termocupla</i>	72
Figura 24 <i>Ilustración salida SSR</i>	72
Figura 25 <i>Probetas lijadas</i>	75
Figura 26 <i>Formas del alambre calefactor</i>	84
Figura 27 <i>Carga específica Vs Temperatura del horno</i>	85
Figura 28 <i>Máximo Esfuerzo de Von Mises</i>	88
Figura 29 <i>Máximo desplazamiento</i>	88
Figura 30 <i>Deformaciones unitarias</i>	89
Figura 31 <i>Funcionamiento del sistema sin Control PID</i>	91
Figura 32 <i>Funcionamiento del sistema con Control PID</i>	93
Figura 33 <i>Curva de calentamiento</i>	94
Figura 34 <i>Curva de enfriamiento</i>	96
Figura 35 <i>Curva de desempeño</i>	97
Figura 36 <i>Curva de normalizado a 910C</i>	98
Figura 37 <i>Curva de temple a 840C</i>	99
Figura 38 <i>Curva de revenido a 300C</i>	99
Figura 39 <i>Comportamiento teórico-real del normalizado</i>	100
Figura 40 <i>Comportamiento teórico-real del temple</i>	100



Figura 41	<i>Comportamiento teórico-real del revenido</i>	101
Figura 42	<i>Comportamiento de la temperatura frente al control PID</i>	102
Figura 43	<i>Comportamiento de la temperatura con pérdidas de calor forzadas</i>	103
Figura 44	<i>Probetas sin tratamiento térmico</i>	106
Figura 45	<i>Probetas templadas</i>	106
Figura 46	<i>Probetas templadas y revenidas</i>	106



ÍNDICE DE ECUACIONES

	Pág.
Ecuación 1 <i>Transferencia de calor por conducción</i>	29
Ecuación 2 <i>Transferencia de calor por convección</i>	30
Ecuación 3 <i>Coefficiente volumétrico de expansión térmica</i>	30
Ecuación 4 <i>Número de Grashof</i>	30
Ecuación 5 <i>Número de Nusselt</i>	31
Ecuación 6 <i>Coefficiente de convección</i>	31
Ecuación 7 <i>Pérdidas de calor por radiación</i>	31
Ecuación 8 <i>Pérdidas por conducción</i>	52
Ecuación 9 <i>Resistencia térmica total</i>	52
Ecuación 10 <i>Pérdidas de calor por convección y radiación</i>	52
Ecuación 11 <i>Coefficiente de radiación</i>	52
Ecuación 12 <i>Equilibrio térmico</i>	52
Ecuación 13 <i>Temperatura externa del horno</i>	52
Ecuación 14 <i>Convergencia de T₄</i>	52
Ecuación 15 <i>Temperatura en cada interfaz</i>	53
Ecuación 16 <i>Diferencia de temperatura</i>	53
Ecuación 17 <i>Área efectiva</i>	54
Ecuación 18 <i>Resistencia Térmica Total</i>	54
Ecuación 19 <i>Conductividad Térmica</i>	54
Ecuación 20 <i>Longitud característica</i>	55
Ecuación 21 <i>Área de abertura</i>	55
Ecuación 22 <i>Pérdidas de calor por radiación</i>	55
Ecuación 23 <i>Pérdidas de calor aportado a la probeta</i>	56
Ecuación 24 <i>Pérdidas totales de calor en una pared</i>	56
Ecuación 25 <i>Potencia del horno</i>	56
Ecuación 26 <i>Energía total requerida</i>	57
Ecuación 27 <i>Calor absorbido por el aire</i>	57
Ecuación 28 <i>Masa del aire</i>	57
Ecuación 29 <i>Volumen de la cámara interna</i>	57
Ecuación 30 <i>Interpolación de la densidad del aire</i>	57
Ecuación 31 <i>Periodo de calentamiento</i>	57
Ecuación 32 <i>Calor necesario para calentar el horno</i>	58
Ecuación 33 <i>Eficiencia del horno</i>	58
Ecuación 34 <i>Masa del horno</i>	58
Ecuación 35 <i>Volumen del acero</i>	58
Ecuación 36 <i>Volumen de la fibra cerámica</i>	58
Ecuación 37 <i>Volumen del ladrillo alúmina</i>	58
Ecuación 38 <i>Volumen del ladrillo de mullita</i>	58
Ecuación 39 <i>Potencia de las resistencias eléctricas</i>	59
Ecuación 40 <i>Corriente eléctrica</i>	59



Ecuación 41 Resistencia equivalente	59
Ecuación 42 Resistencia total en el sistema.....	59
Ecuación 43 Resistencia en caliente	59
Ecuación 44 Resistencia a temperatura ambiente	60
Ecuación 45 Diámetro del hilo	60
Ecuación 46 Longitud radiante del hilo.....	60
Ecuación 47 Diámetro de la espiral	60
Ecuación 48 Número de espiras.....	61
Ecuación 49 Longitud de la espira comprimida	61
Ecuación 50 Paso de arrollamiento.....	61
Ecuación 51 Longitud de la espira comprimida	61
Ecuación 52 Forma general.....	66
Ecuación 53 Capacitancia C_A	66
Ecuación 54 Capacitancia C_B	66
Ecuación 55 Capacitancia C_C	66
Ecuación 56 Potencia de alimentación	66
Ecuación 57 Sobreimpulso porcentual	67
Ecuación 58 Tiempo de asentamiento.....	67
Ecuación 59 Ecuación de polo dominante	67
Ecuación 60 Función de transferencia del control PID (base)	67
Ecuación 61 Ganancia unitaria	67
Ecuación 62 Ley de Ohm	69
Ecuación 63 Tiempo de sometimiento para el ensayo de temple.....	73
Ecuación 64 Balance de calor	89
Ecuación 65 Flujo de calor de paredes a probeta	90
Ecuación 66 Pérdidas de calor a través de paredes	90
Ecuación 67 Diferencial de transferencia de calor	90
Ecuación 68 Función de transferencia de primer orden	91
Ecuación 69 Función de transferencia base de segundo orden.....	92
Ecuación 70 Función de transferencia del sistema	92
Ecuación 71 Temperatura de desconexión	101
Ecuación 72 Temperatura de activación	101



CAPÍTULO I

1 INTRODUCCIÓN

1.1 Problema de Investigación.

En el contexto de América Latina, uno de los desafíos recurrentes reside en la limitada capacidad de innovación y generación de conocimientos con potencial económico. La deficiente generación de conocimientos en estos países impacta negativamente en su competitividad en el mercado internacional [1]. Ecuador, en particular, enfrenta grandes desafíos en el sector manufacturero, específicamente en el área de tratamientos térmicos superficiales que buscan modificar y mejorar las propiedades físicas y mecánicas de diversos metales.

Un desarrollo inadecuado de los tratamientos térmicos en la industria ecuatoriana y el incremento de la demanda afecta directamente en la competitividad de los productos en los mercados internacionales [2]. A partir de 1950, el país ha desarrollado infraestructura que propicia el fomento de la Ciencia y Tecnología en el Ecuador [1]. A pesar de los esfuerzos realizados por las empresas ecuatorianas en el campo de la metalurgia, se evidencia la necesidad de un progreso tecnológico significativo para potenciar la competitividad en el ámbito laboral [3].

La carencia de infraestructura especializada, ausencia de estudios exhaustivos y la falta de equipo adecuado para hacer tratamientos térmicos superficiales, constituyen grandes limitantes en la obtención de materia prima calificada. En este sentido, el objetivo principal de este trabajo de titulación es abordar y superar estas limitaciones con la implementación de un horno con control electrónico para tratamientos térmicos superficiales en el laboratorio de manufactura. Este enfoque permite resolver una necesidad práctica y le proporciona a la Universidad Técnica del Norte un equipo didáctico fundamental. El horno contribuirá a mejorar el estudio y la comprensión de los efectos y reacciones de los metales al ser sometidos a altas temperaturas [4], profundizando el entendimiento de estos procesos con una interacción en tiempo real, lo cual amplía los conocimientos en el campo de la automatización de procesos [5].

Actualmente, la disponibilidad limitada de información para investigaciones vinculadas con el tema destaca la urgencia de la implementación de este equipo. Su incorporación es crucial para la generación de datos reales que enriquecerán las futuras investigaciones en el ámbito metalúrgico.



1.2 Justificación

La construcción del horno de tratamientos térmicos superficiales forma parte de la iniciativa “Fortalecimiento del sistema productivo basado en eficiencia e innovación” dentro de la Estrategia Nacional para el cambio de la Matriz Productiva. En Ecuador, a pesar de que el PIB real experimentó un crecimiento hasta un 14,5% en 2017, con un aumento en la contribución de la industria manufacturera, el porcentaje global sigue siendo relativamente bajo. Esto señala que la participación de la industria manufacturera no se ha desarrollado, y no ha alcanzado su pleno potencial, lo que limita la capacidad de producción en el país [6].

La poca atención y la creciente demanda de la industria manufacturera, puntualmente en el área de tratamientos térmicos superficiales, ha representado un gran desafío para el Ecuador y su competitividad en los mercados internacionales. La Universidad Técnica del Norte, específicamente la carrera de Ingeniería Automotriz se verá beneficiada con la implementación de un horno de tratamientos térmicos superficiales, mejorando la comprensión de los cambios físicos y mecánicos que experimentan los metales al ser sometidos a diferentes procesos. Esta implementación fortalecerá el aprendizaje práctico y elevará el nivel de conocimientos adquiridos por los estudiantes [2], determinando las mejoras en las propiedades que el material adquiere al ser sometido a estos tratamientos [7].

La viabilidad del trabajo de titulación está respaldada por la disponibilidad de la materia prima para la elaboración de probetas [8] y la existencia de laboratorios competentes para llevar a cabo los ensayos [9]. Esto será fundamental para realizar los ensayos pertinentes que permitan evaluar las propiedades postratamiento del material, de acuerdo con las normativas preestablecidas. Estas pruebas son necesarias para garantizar la operación del horno y la validación del proceso.

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo General*

Diseñar y construir un horno para tratamientos térmicos superficiales con control electrónico, para un preciso manejo del proceso en el acero.

1.3.2 *Objetivos Específicos*

- Modelar matemáticamente el comportamiento termodinámico del horno.



- Implementar un sistema de control electrónico avanzado que permita una regulación precisa de la temperatura.
- Realizar tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido en probetas de acero.
- Analizar los resultados obtenidos para sustentar el funcionamiento correcto del horno para tratamientos térmicos superficiales.

1.4 Alcance

El trabajo de grado tiene como objetivo la construcción de un horno de tratamientos térmicos superficiales destinado al Laboratorio de Procesos de Manufactura de la carrera de Ingeniería Automotriz. El horno será capaz de gestionar de manera precisa la temperatura para realizar procesos de tratamiento térmicos superficiales, que serán rigurosamente controlados mediante un sistema electrónico. El horno estará compuesto de las siguientes especificaciones técnicas: resistencias eléctricas de efecto Joule, materiales aislantes, un volumen de 0.0129 m³ (cámara térmica), un rango de temperatura de operación entre 16C a 1200C y un voltaje de funcionamiento de 220V.

La implementación de un sistema de control basado en el lenguaje de programación será necesaria para la estructuración de la configuración que regirá la regulación y control del sistema. Un horno de tratamientos térmicos superficiales debe ser capaz de realizar diversos tratamientos a un material. Sin embargo, el enfoque principal será el normalizado, temple y revenido del acero ASTM A36, un material predominante en el mercado. Para validar las propiedades del material postratamiento, se llevará a cabo ensayos de dureza, basado en la norma ISO 6508. Estos ensayos permitirán evaluar los cambios en las propiedades físicas y mecánicas del acero después de haberse sometido a procesos de tratamientos térmicos superficiales.

La evaluación de la viabilidad operativa del horno será crucial para determinar su implementación exitosa en el Laboratorio de Procesos de Manufactura. El análisis se centrará en la operación del equipo y su capacidad para cumplir con los estándares exigidos, considerando la reproducibilidad y consistencia en los resultados obtenidos. La implementación exitosa de este equipo en el laboratorio contribuirá significativamente al avance de las capacidades de investigación y desarrollo en el ámbito de la Ingeniería Automotriz, específicamente en el campo de procesos de manufactura.



CAPÍTULO II

2 MARCO TEÓRICO

2.1 Horno para Tratamientos Térmicos

Esta investigación analiza los aspectos fundamentales de los hornos industriales, se abarca su definición, clasificación y funcionamiento, para establecer una base teórica que permita el diseño y la construcción de un horno acorde con los requerimientos del proyecto.

Un horno es equipo diseñado para generar y mantener calor de forma controlada en un espacio determinado, lo que facilita la aplicar de procesos térmicos que alteran las propiedades físicas y químicas de diversos materiales [10]. En el ámbito industrial, los hornos se clasifican en función de su método de calentamiento y de la atmósfera que pueden sostener, cada uno está diseñado para cumplir con necesidades específicas [11]. Entre estas categorías se incluyen los hornos a gas, hornos de atmósfera controlada y hornos eléctricos.

2.1.1 Hornos a Gas

Los hornos a gas como se muestra en la Figura 1 utilizan gas natural o propano como combustible, para generar calor al mezclarlo con oxígeno en una cámara interna. Aunque no cuenten con control electrónico de temperatura, son económicos debido al bajo costo del combustible [12]. Estos hornos se clasifican en dos tipos: los hornos de combustión directa, donde los productos entran en contacto con la cámara del horno, y los de combustión indirecta, que aíslan la cámara de los gases de combustión, lo que ofrece un proceso más limpio y controlado.

Figura 1

Horno a gas Wisconsin Oven



Tomado de: Wisconsin Oven, Horno sin cita previa para servicio pesado (Serie SWH), 2017 [13].



2.1.2 Hornos de Atmosfera Controlada

A diferencia de los hornos a gas, estos hornos utilizan una atmósfera gaseosa en la cámara de combustión que interactúa directamente con el material tratado protegiéndolo, esto previene reacciones no deseadas [12]. Entre ellos, destacan los hornos al vacío y reductores.

Los hornos al vacío eliminan gases para evitar reacciones indeseadas en metales reactivos, alcanzan temperaturas de hasta 1260 C. Estos hornos emplean sistemas avanzados como bombas criogénicas, para mantener un vacío ultraalto y bajas concentraciones de hidrógeno [14]. Por otra parte, los hornos reductores generan atmósferas que eliminan oxígeno de los óxidos metálicos, esto previene la oxidación y favorece a reducción. Estas atmósferas se producen mediante sistemas exotérmicos, que mezclan hidrocarburos con aire seco, o endotérmicos, que utilizan reacciones catalizadas entre gases [15].

2.1.3 Hornos Eléctricos

Finalmente, los hornos eléctricos destacan en la industria por su rendimiento constante, facilidad de uso, precisión en el control de temperatura y alta eficiencia en la conversión de energía [10]. Su funcionamiento se basa en la transformación de electricidad en calor mediante una resistencia [16]. Se clasifican en hornos de calentamiento por inducción y resistencia.

La Figura 2 ilustra un horno eléctrico por inducción. Este tipo de hornos son eficientes y respetuosos con el medio ambiente [17]. Su funcionamiento se basa en la conversión de corriente alterna en calor, mediante la generación de un campo electromagnético a través de una bobina de inducción, esto induce corrientes eléctricas en el material metálico, lo que eleva su temperatura y permite la fusión del material. Son ideales para fundir metales de alta calidad y pureza [18].

Figura 2

Horno eléctrico por inducción.



Tomado de: CarboSystem. Tipos de hornos industriales, (2021) [19]



Los hornos eléctricos por resistencia generan calor mediante el efecto Joule. La corriente eléctrica circula a través de un material con alta resistividad eléctrica, lo que produce calor que se transfiere al aire dentro de la cámara del horno. Este tipo de horno se emplea en procesos como tratamientos térmicos, cocción de cerámicas y fundiciones a menor escala. Ofrecen ventajas como control preciso de temperatura, eficiencia energética y uniformidad en el calentamiento. Además, su diseño y construcción se basan en principios de transferencia de calor y en las características termodinámicas de los materiales tratados, lo que garantiza un desempeño óptimo. Estos hornos son esenciales en procesos industriales como temple, revenido y recocido, especialmente en aceros [20]. La Figura 3 presenta un ejemplo de este tipo de horno.

Figura 3

Horno eléctrico por resistencia



Tomado de: Alibaba. Horno eléctrico por resistencia, (2024) [21]

2.2 Propiedades Técnicas de los Materiales del Horno de Tratamientos Térmicos

El diseño de un horno de tratamientos térmico eficiente y seguro incluye materiales refractarios y aislantes para minimizar pérdidas de calor, elementos calefactores para generar energía térmica, materiales estructurales para soporte y protección, y un sistema de control electrónico para regular las condiciones de operación. Para una mejor organización, los materiales se agrupan en las siguientes categorías:

2.2.1 Materiales Refractarios y Aislantes

Los materiales refractarios y aislantes empleados en hornos industriales incluyen ladrillos de mullita, ladrillos altos en alúmina, morteros refractarios y mantas de fibra cerámica. Estos fueron seleccionados por sus propiedades térmicas y mecánicas.

Los ladrillos de mullita, se caracterizan por su aislamiento térmico, baja densidad, alta porosidad y refractariedad, son ideales para reducir el consumo energético en hornos industriales.



Su composición de alúmina y sílice les otorga resistencia química y mejora la eficiencia energética y resistencia al choque térmico [22].

Por otro lado, los ladrillos altos en alumina contiene más del 60% de alúmina, esto le proporciona resistencia a la erosión por escorias ácidas y alcalinas [23]. Estos ladrillos, fabricados a altas temperaturas, desarrollan una estructura mineralógica estable, resistencia mecánica, baja porosidad y mínima deformación. Su bajo contenido de hierro los hace adecuados para procesos en atmósferas reductoras.

Además, el mortero refractario se elabora con materiales refractarios y aditivos que crean una unión hidráulica a temperatura ambiente. Al exponerse a altas temperaturas, forma uniones cerámicas. Su composición de alúmina y sílice le otorga estabilidad y resistencia. Su aplicación requiere agua con aglutinante y un secado completo previo a su uso [24].

Finalmente, las mantas de fibra cerámica, elaboradas con fibras centrifugadas, ofrecen resistencia a cambios bruscos de temperatura y soporta altas temperaturas [25]. Su diseño ligero y flexible facilita su instalación y proporcionó un aislamiento térmico eficiente, resistencia a la humedad, ácidos y aceites.

2.2.2 Elementos Calefactores

Los elementos calefactores transforman la energía eléctrica en calor. La resistencia tipo bobina de alambre Kanthal A-1, fabricada con una aleación de hierro, cromo y aluminio, ofrece alta resistividad, resistencia a la oxidación y soporta temperaturas de hasta 1400 C [26]. Estas propiedades garantizan un rendimiento eficiente, vida útil prolongada y un desempeño seguro en los sistemas de calentamiento.

2.2.3 Materiales Base para Ensayos y Estructural

Los materiales estructurales y de recubrimiento aseguran la estabilidad mecánica y la protección del horno frente a factores ambientales y operativos.

El acero ASTM A36 (Sociedad Americana de Pruebas y Materiales), un material estructural de bajo contenido de carbono, combina resistencia, ductilidad y facilidad de soldadura [27]. Su balance de propiedades mecánicas, junto con su costo accesible y capacidad para soportar cargas moderadas, lo hacen ideal para la construcción de la estructura del horno.



El acero inoxidable AISI 304 (Instituto Americano del Hierro y Acero), está compuesta por cromo y níquel, esto ofrece buenas propiedades mecánicas gracias a su estructura austenítica. El cromo proporciona protección contra la oxidación, mientras que el níquel mejora la tenacidad y la ductilidad [28]. Además, este material, estable hasta 925 C, es fácil de soldar y manipular.

2.2.4 Componentes del Sistema de Control Electrónico

El sistema de control electrónico regula las condiciones internas del horno. Incluye dispositivos diseñados para medir, supervisar y controlar las variables del proceso.

La termocupla tipo K formada por alambres de chromel y alumel, mide la temperatura y produce una tensión eléctrica en milivoltios al recibir calor [29]. Su diseño con bayoneta facilita su instalación y extracción, además de ofrecer una rápida respuesta a los cambios térmicos.

El controlador de temperatura, modelo TP7-MC10, fue configurado para mantener estable la temperatura mediante un algoritmo autoajutable. Una pantalla LCD (Pantalla de Cristal Líquido) permitió la visualización de la temperatura actual y la establecida. El sistema incorporó alarmas de sobrecalentamiento y funciones de comunicación [30].

El relé sólido monofásico MAXWELL fue empleado para controlar cargas eléctricas mediante un sistema de disparo por nivel y un interruptor semiconductor. El diseño ofreció resistencia a impactos, vibraciones y temperaturas extremas [31].

El disyuntor Easy9 fue utilizado para proporcionar protección ante sobrecalentamientos y protección magnética frente a cortocircuitos [32]. La instalación en riel permitió un montaje seguro y compacto, lo que garantizó una desconexión inmediata ante fallos eléctricos.

El interruptor selector de dos posiciones EBASEE EBSA4-BD21 permitió la conmutación manual mediante el giro de una perilla. La estructura metálica robusta protegió el mecanismo contra agentes externos y facilitó tanto la instalación como el funcionamiento [33].

Finalmente, el indicador luminoso AD22-22DS/G LED (Diodo Emisor de Luz) fue implementado para señalar el estado operativo del sistema. La tecnología LED aseguró una larga vida útil y un bajo consumo energético. Este dispositivo resultó adecuado para aplicaciones en paneles de control y maquinaria industrial [34].



2.3 Introducción a los Sistemas de Control de Temperatura

Para realizar un correcto tratamiento térmico, es fundamental implementar un controlador de temperatura que asegure la precisión y estabilidad del proceso. Un controlador PID (Proporcional, Integral, Derivativo) es un mecanismo de control utilizado por su capacidad para gestionar procesos de manera precisa, consistente y confiable. El funcionamiento del controlador PID se basa en estabilizar el proceso y compensar perturbaciones externas. Esto lo convierte en una herramienta precisa y adecuada para cumplir con los requisitos de diversos procesos industriales. Estos controladores destacan por su capacidad de configuración, lo que permite ejecutar operaciones de forma regular y estable [35]. Los tipos de controladores básicos son: ON/OFF, proporcional y PID, estos se detallan a continuación:

El funcionamiento del control ON/OFF radica en el encendido y apagado de la salida en función de la temperatura. Si esta supera el valor deseado, la salida se desactiva, y si desciende por debajo del límite establecido, se reactiva. Para ello el controlador trabaja con un rango de tolerancia que regula el encendido y apagado según la temperatura medida.

El controlador proporcional ajusta la potencia suministrada en función de la temperatura medida. Actúa como un regulador y reduce la potencia a medida que la temperatura aumenta hasta alcanzar el valor deseado. Una vez alcanzada esta temperatura se mantiene constante.

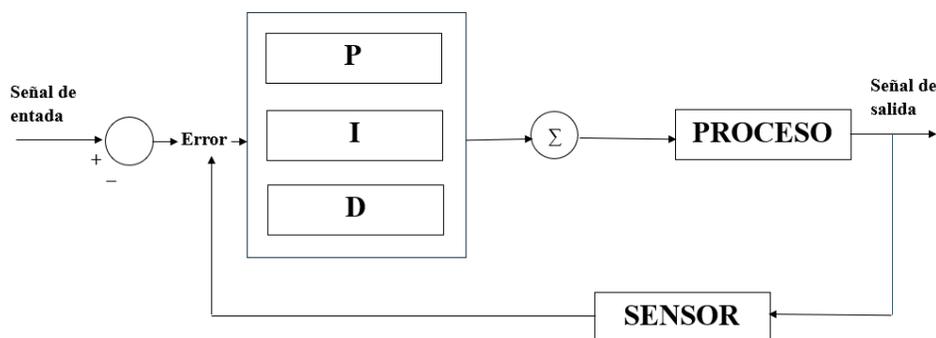
El controlador PID combina los dos tipos anteriores y opera con una tolerancia establecida, basados en un control ON/OFF. Regula la potencia hasta alcanzar la temperatura deseada, lo que permite un control más preciso y eficiente de la temperatura.

Al evaluar los diferentes tipos de controladores, el controlador PID es la opción más adecuada para regular la temperatura del horno de tratamientos térmicos. Este controlador establece la temperatura dentro de un rango óptimo y la mantiene constante, lo que previene fluctuaciones que podrían afectar negativamente el tratamiento térmico. La Figura 4 muestra el principio de funcionamiento de un controlador PID. Una señal de entrada llega al controlador PID, que, mediante una función de transferencia, genera una señal de salida hacia los elementos calefactores del horno. El sensor de temperatura recoge esta señal de salida y la reintroduce al controlador con un mínimo error, el ciclo se repite hasta alcanzar la temperatura deseada.



Figura 4

Esquema de un controlador PID



2.4 Transferencia de Calor en Hornos

La transferencia de calor es la energía en tránsito generada por una diferencia de temperatura. Se manifiesta a través de los mecanismos de conducción, convección y radiación, los cuales pueden describirse matemáticamente para determinar la energía transferida por unidad de tiempo [36]. En los hornos industriales, los aislamientos tienen la forma de una pared plana en el cuerpo del horno. El análisis de la transferencia de calor unidimensional en una pared plana permite comprender la transferencia de energía en este sistema. El revestimiento, compuesto por varias capas, involucra los tres mecanismos de transferencia de calor.

2.4.1 Conducción

La conducción se define como la cantidad de calor que puede transferirse a través de una unidad de área en un tiempo determinado bajo un gradiente térmico unitario. La transferencia depende de las propiedades del material y la temperatura. Es un mecanismo que ocurre de dos formas principales. La primera es a través de la interacción molecular, donde las moléculas con mayor energía, representada por su temperatura, transfieren calor a las moléculas de menor energía. Este proceso ocurre en sólidos, líquidos y gases cuando existe un gradiente de temperatura. La segunda forma se da mediante los electrones libres, la concentración de estos en los metales hace que sean excelentes conductores de calor [37].

La transferencia de calor por conducción se describe mediante la Ley de Fourier, presentada en la Ecuación 1.

$$Q_c = \frac{k * A * (T_{Interior} - T_{Ambiente})}{L}$$

Ecuación 1



Donde el $A = \text{Área (m}^2\text{)}$, $T_{\text{Interior}} - T_{\text{Ambiente}} = \text{Gradiente de temperatura (K)}$, $k = \text{Conductividad térmica del material (W/mK)}$ y $L = \text{Longitud característica (m)}$.

2.4.2 Convección

La convección combina la conducción, originada por el movimiento aleatorio de las moléculas, y el movimiento macroscópico del fluido causado por fuerzas externas, como gradientes de densidad o diferencias de presión. Esta se produce entre una superficie y un fluido en movimiento cuando existe una diferencia de temperatura entre ambos [37]. Según el origen del movimiento, la convección puede ser forzada, cuando dispositivos como ventiladores o bombas impulsan el flujo del fluido, o natural, si los cambios de densidad del fluido por diferencias de temperatura generan el movimiento de manera espontánea.

La transferencia de calor por convección se describe mediante la Ley de enfriamiento de Newton y se presenta en la Ecuación 2.

$$Q_{cv} = h_c * A * (T_4 - T_{\text{Ambiente}}) \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde $h_c = \text{Coeficiente de convección (W/m}^2\text{K)}$

- **Números adimensionales en el análisis de convección**

En la convección, se utilizan números adimensionales para analizar y calcular el coeficiente de transferencia de convección (h_c) y el flujo de calor.

El coeficiente volumétrico de expansión térmica describe la variación de la densidad de un fluido cuando cambia la temperatura a presión constante. Este coeficiente es importante en materiales cuyo volumen experimenta cambios significativos, como los gases. [38]. En el caso de los gases perfectos, se expresa mediante la Ecuación 3.

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{Ambiente}}} \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde $T_{\text{Ambiente}} = \text{Temperatura ambiente (K)}$

El número de Grashof es adimensional y representa la relación entre las fuerzas de flotación, que impulsan el movimiento del fluido, y las fuerzas viscosas, que lo resisten [39]. Su cálculo se expresa mediante Ecuación 4, mide la relación entre las fuerzas de empuje y las viscosas.

$$G_r = (\Delta T * \beta) \frac{L^3 * \rho^2 * g}{\nu^2} \quad \text{Ecuación 4}$$



Donde g =Gravedad (m/s^2), ρ = Densidad (kg/m^3), β = Expansión volumétrica y ν = viscosidad cinemática (m^2/s).

El número de Nusselt es un valor adimensional que indica de transferencia de calor de un fluido en movimiento por convección sobre una superficie. Compara la transferencia de calor por convección con la que ocurriría solo por conducción. Su expresión matemática está dada por la Ecuación 5 [36].

$$N_U = 0.68 + \frac{0.670 * (G_r * P_r)^{\frac{1}{4}}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{P_r}\right)^{\frac{9}{16}}\right)^{\frac{4}{9}}} \quad \text{Ecuación 5}$$

La fórmula incluye el número de Prandtl (P_r), que representa la relación entre la difusividad del momento y la difusividad térmica. Bajo la condición $G_r * P_r < 10^9$, se establece esta relación en un fluido.

El coeficiente de convección mide la eficiencia con la que el calor se transfiere entre una superficie sólida y un fluido en movimiento [40]. Se define a través de la Ecuación 6.

$$h_c = \frac{N_U * k}{L} \quad \text{Ecuación 6}$$

2.4.3 Radiación

La radiación es el proceso de transferencia de calor en forma de ondas electromagnéticas entre cuerpos de diferente temperatura, sin necesidad de un medio material. A diferencia de la conducción y la convección, la radiación es más eficiente en el vacío. La energía térmica es emitida por sólidos, líquidos y gases debido a cambios en las configuraciones electrónicas de sus átomos o moléculas [36]. Las pérdidas de calor por radiación se describen con la Ecuación 7 .

$$Q_r = \varepsilon * \sigma * A * (T_{Interior}^4 - T_{Ambiente}^4) \quad \text{Ecuación 7}$$

Donde ε = Emisividad del material superficial, σ = Constante de Stefan-Boltzmann es igual a $5.67 \times 10^{-8} (W/m^2 K^4)$.

2.5 Procesos de Manufactura: Fundamentos de los Tratamientos Térmicos

Comprender los procesos de manufactura, en particular los tratamientos térmicos, resulta esencial para diseñar un equipo eficiente. Esto permite desarrollar un sistema capaz de realizar procesos controlados y reproducibles, lo que garantiza el éxito del proyecto.



Los procesos de manufactura incluyen actividades para transformar materias primas en productos terminados mediante operaciones que modifican la forma, las propiedades y el acabado de los materiales. Como se muestra en la

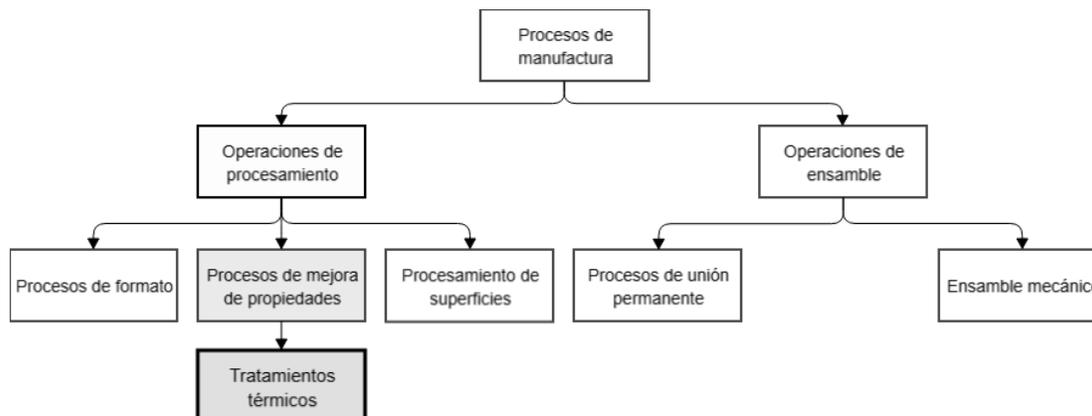
Figura 5 estos procesos se dividen en dos categorías principales: operaciones de procesamiento y operaciones de ensamble. Las operaciones de procesamiento transforman un material en otro más avanzado al modificar sus propiedades físicas y químicas, mientras que las operaciones de ensamble combinan componentes individuales para formar una nueva pieza [41].

En las operaciones de procesamiento, los procesos de formado transforman las materias primas, y las operaciones de procesamiento mejoran la apariencia y funcionalidad de los materiales. Sin embargo, en los procesos de mejora de propiedades destacan los tratamientos térmicos, estos son relevantes para la investigación, ya que modifican las propiedades internas de los materiales sin alterar su forma.

Los tratamientos térmicos transforman propiedades como dureza, resistencia, ductilidad y tenacidad de los materiales, lo que mejora su rendimiento e incrementa su rango de aplicación. Entre los principales procesos de tratamiento térmico se encuentran el temple, revenido y normalizado.

Figura 5

Clasificación de los procesos de manufactura



Adaptado de: Fundamentos de manufactura moderna, Groover M. 2007 [41].

2.6 Introducción a los Tratamientos Térmicos

Al aplicar tratamientos térmicos a materiales metálicos como el acero, se transforma su microestructura para modificar sus propiedades mecánicas y mejorar su desempeño. Este proceso



requiere que el material pase por diferentes procesos, donde se somete a temperaturas específicas, tiempos de sometimiento y velocidades de enfriamiento que varían según el medio utilizado. Por esta razón, un sistema de control eficiente es fundamental para que el horno regule la temperatura de manera precisa. Dado que la carrera de Ingeniería Automotriz no cuenta con un horno para tratamientos térmicos, se busca implementar un equipo que facilite la experimentación de estos procesos; este equipo permitirá mejorar los conocimientos y contribuirá al desarrollo.

Un tratamiento térmico se define como la manera de mejorar las propiedades mecánicas de un material como la resistencia, ductilidad, dureza y otras por medio de un calentamiento o enfriamiento en el material [42]. Antes de realizar un tratamiento térmico, es importante considerar la clasificación de los materiales aptos para este tipo de proceso. Los materiales más utilizados para tratamientos térmicos superficiales se pueden clasificar en tres grupos principales según su composición química y estructura atómica. Estos grupos son: metales, cerámicos y polímeros [43].

Los materiales cerámicos son compuesto metálicos y no metálicos con estructura cristalina rígida que les otorga dureza y fragilidad [44]; y aunque no pueden tratarse térmicamente como los metales, sí pueden fortalecerse mediante calentamiento y enfriamiento rápido; en contraste, los polímeros, compuestos por hidrógeno, carbono y otros elementos, carecen de estructura cristalina, pero algunos, pueden mejorar sus propiedades mediante recocido y normalizado [45].

Los metales son los materiales más utilizados para realizar tratamientos térmicos debido a su versatilidad y disponibilidad; además, proporcionan una buena capacidad para adaptarse a diferentes estructuras, buena conductividad térmica y capacidad de mejorar sus características. Dentro de los metales, los aceros son los más comunes para ser tratados térmicamente por su alto contenido de hierro y carbono.

2.6.1 El Acero como Material para Tratamientos Térmicos

El acero es uno de los materiales más utilizados para realizar tratamientos térmicos porque su composición permite modificar sus propiedades mecánicas mediante cambios en su estructura cristalina [46]. La versatilidad de esta aleación permite llevar a cabo procesos térmicos como el temple, revenido y normalizado, y de esta manera mejorar sus propiedades.

El acero presenta diferentes fases según su composición, temperatura y tratamiento térmico. Estas fases favorecen la formación de ferrita, cementita, martensita, perlita y austenita, lo

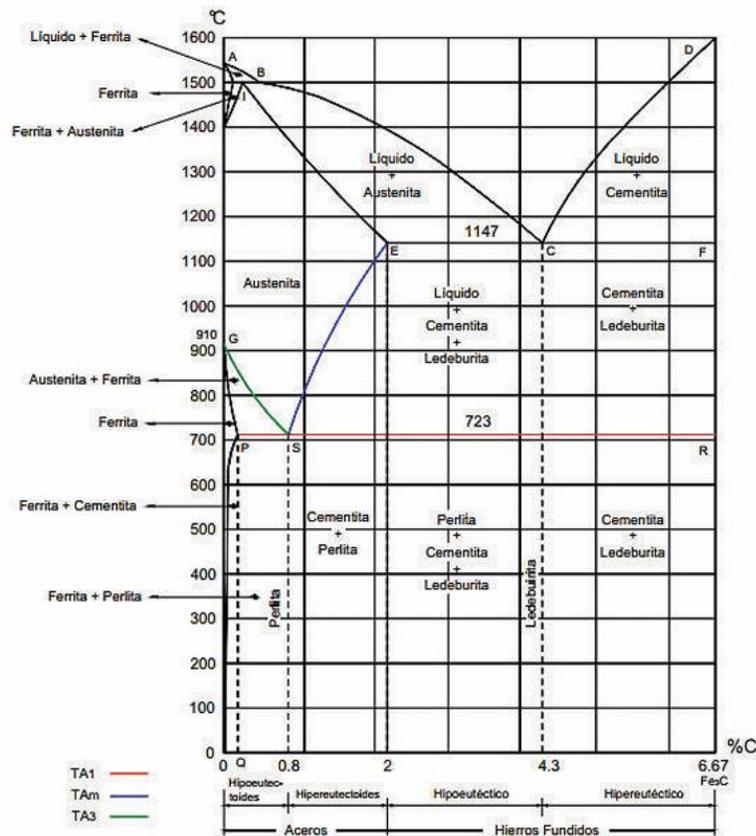


que mejora la dureza, tenacidad y resistencia, según el proceso aplicado. Las fases del acero son fundamentales en los tratamientos térmicos como el normalizado, temple y revenido, ya que, tras ser sometido a cualquiera de estos procesos, sus propiedades y microestructura cambian.

El diagrama de fase Hierro-Carbono (Fe-C) que se muestra en la Figura 6 facilita la comprensión de las propiedades y comportamientos de los aceros cuando se exponen a altas temperaturas o tratamientos térmicos. Este diagrama está organizado según la cantidad de carbono presente en un acero y muestra las temperaturas a las que el acero puede alcanzar sus diferentes fases [47]. Según su composición de carbono, los aceros pueden clasificarse como hipoeutectoides (<0.8%C) o hipereutectoides (>0.8%C). Esto permite identificar las temperaturas a las que el acero debe que ser sometido, según el tratamiento térmico que se le desee aplicar.

Figura 6

Diagrama de fase Hierro-Carbono



Tomado de: Diseño y construcción de un horno calentado por resistencias eléctricas que trabaje en un rango de temperaturas entre 1000 y 1350 grados centígrados, y controlado por un sistema computarizado, (2016) [48].



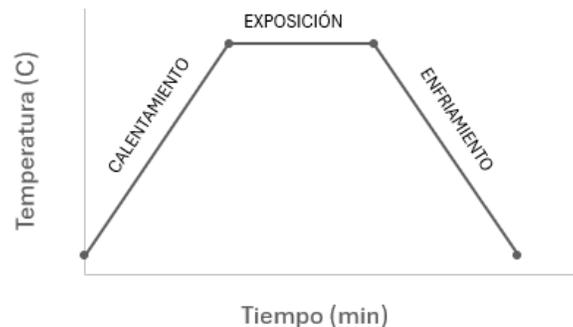
2.6.2 *Procesos para un Tratamiento Térmico*

Para realizar un tratamiento térmico, es necesario considerar cuatro procesos principales que garantizan un desarrollo eficiente. Estos procesos incluyen determinar la temperatura de calentamiento adecuada para tratar el material, establecer el tiempo de exposición requerido para modificar la microestructura y controlar la velocidad de enfriamiento, la cual influirá directamente en el cambio de sus propiedades [48].

La temperatura de calentamiento es el primer factor a considerar en un tratamiento térmico, ya que determina el tipo de proceso a realizar. Esta temperatura depende de la composición de carbono del acero y del tratamiento específico que se quiera aplicar. El tiempo de exposición es otro factor esencial, ya que varía según la composición del acero, el tipo de tratamiento y el tamaño de la probeta. Por último, la velocidad de enfriamiento es crucial para obtener las propiedades y la microestructura deseadas. Esta velocidad depende del tratamiento térmico aplicado y del medio utilizado para enfriar la probeta. La Figura 7 muestra el proceso de tratamiento térmico, con la información sobre el aumento de temperatura, el tiempo de exposición y el enfriamiento aplicado al material tratado.

Figura 7

Diagrama de Temperatura-Tiempo



2.6.3 *Clasificación de los Tratamientos Térmicos*

Los principales tratamientos térmicos aplicados a los aceros son el normalizado, el temple y el revenido. Como se mencionó anteriormente, la temperatura a la que se someterá el material depende del tratamiento que se desee aplicar.

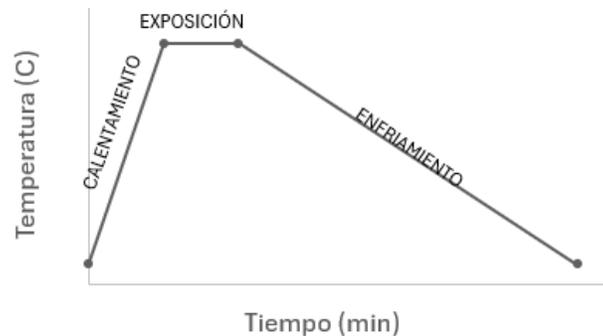
El normalizado mejora las características de resistencia y ductilidad del material. Este proceso se utiliza en aceros de baja aleación y acero al carbono para mejorar sus propiedades



mecánicas y microestructurales. Durante el tratamiento, el material se calienta a una temperatura considerable y luego se enfría lentamente al aire [49]. El acero debe alcanzar una temperatura cercana a su punto de austenización, entre 900C y 910C, según su contenido de carbono. La Figura 8 muestra la curva de temperatura-tiempo del tratamiento térmico de normalizado.

Figura 8

Diagrama temperatura-tiempo (normalizado)



El temple es un proceso empleado especialmente en aceros de baja aleación y al carbono que consiste en elevar la temperatura de la pieza y luego enfriarla rápidamente, lo que altera la microestructura y las propiedades del material. El agua es el medio de enfriamiento más común, aunque el aceite produce mejores resultados [50]. Durante el temple se forma martensita, esto incrementa la dureza del material. Sin embargo, las tensiones entre los átomos de carbono y hierro pueden generar fragilidad, por lo que se recomienda un tratamiento de revenido para eliminar dichas tensiones. La temperatura que debe alcanzar el acero para ser templado oscila entre los 810C a 840C, según su contenido de carbono. La Figura 9 muestra la curva de temperatura-tiempo del tratamiento térmico de temple.

Figura 9

Diagrama temperatura-tiempo (temple)

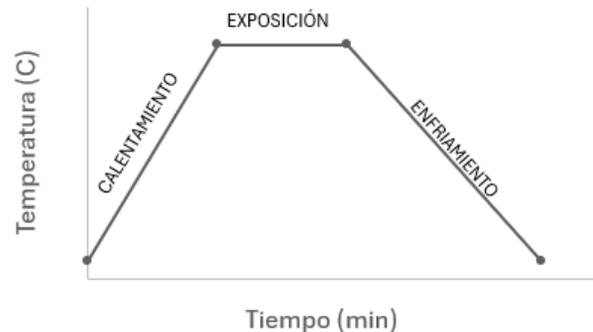




Al templar el acero, se generan tensiones en la microestructura que provocan fragilidad en el material. Para aliviar estas tensiones, se debe realizar un revenido. Este tratamiento consiste en someter al material a un incremento de temperatura para reducir la dureza y aumentar la tenacidad después de enfriado lentamente al aire [51]. Al igual que el normalizado, la temperatura del revenido depende del contenido de carbono del material, y se encuentra en un rango de 300C a 500C. La Figura 10 muestra la curva temperatura-tiempo del tratamiento térmico de revenido, que utiliza el mismo medio de enfriamiento que el normalizado, es decir, el aire. Por ello, la velocidad de enfriamiento será similar pero más rápida debido a la menor carga térmica a la que el material es sometido.

Figura 10

Diagrama temperatura-tiempo (revenido)



La correcta ejecución de los tratamientos térmicos de normalizado, temple y revenido asegura el funcionamiento óptimo del horno para tratamientos térmicos. Cumplir con estos procesos es fundamental, ya que garantiza que el material adquiera las propiedades mecánicas deseadas y demuestra la capacidad del horno para mantener las condiciones térmicas necesarias.

2.7 Ensayo de dureza Rockwell según la norma ISO 6508

Para evaluar el cambio en las propiedades mecánicas de las probetas después de ser sometidas a tratamientos térmicos, se realizaron ensayos de dureza. Estos permiten cuantificar los efectos del tratamiento y verificar que el horno haya alcanzado las temperaturas requeridas. La dureza es la resistencia de un material a la penetración de un cuerpo más duro. No es una propiedad física fundamental, ya que puede modificarse mediante tratamientos térmicos [52].

El ensayo de dureza Rockwell es un método no destructivo que mide la macrodureza en materiales metálicos. Consiste en aplicar una carga determinada sobre un indentador y medir la



profundidad de la huella resultante [53]. La dureza se expresa en escalas identificadas por letras que varían según el tipo de penetrador y la carga aplicada. Existen 30 escalas Rockwell, adecuadas para distintos materiales y aplicaciones. El ensayo emplea dos tipos de penetradores: bolas de carburo de tungsteno de distintos diámetros y un cono con punta de diamante [54]. La

Tabla 1 muestra las escalas más utilizadas, junto con la carga preliminar y principal, el tipo de indentador y su aplicación:

Tabla 1
Escalas Rockwell

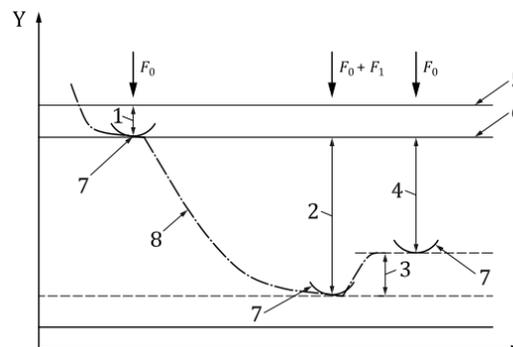
Escala	F_0 (N)	F (N)	Indentador	Aplicación
A	98.07	588.4	Cono de diamante	Carburos cementados y acero con endurecido superficialmente.
B	98.07	980.07	Bola de 1.5875 mm	Cobre, aluminio, acero bajo en carbono, hierro maleable.
C	98.07	1471 k	Cono de diamante	Acero de alto contenido de carbono, titanio, hierro fundido, acero inoxidable.
E	98.07	980.7	Bola de 3.175 mm	Hierro fundido, aleaciones de aluminio y magnesio, metal de rodamientos.
F	98.07	588.4	Bola de 1.5875 mm	Metales blandos, aleaciones de cobre recocido y láminas delgadas.

Adaptado de: Metallic materials - Rockwell hardness test - ISO 6508-1, (2023) [54].

La Figura 11 muestra el procedimiento del ensayo Rockwell, que consta de tres etapas. Primero, la probeta y el penetrador entran en contacto, se aplica una carga preliminar F_0 , se mantiene y se mide la profundidad inicial de la indentación. Luego, la carga aumenta hasta un nivel total $F_0 + F$ y se sostiene durante un tiempo determinado. Finalmente, la carga adicional F se retira y regresa a F_0 , y se mide la profundidad final de la indentación. La dureza Rockwell se obtiene a partir de la diferencia entre las profundidades final e inicial.

Figura 11

Ensayo de dureza Rockwell



Tomado de: Metallic materials - Rockwell hardness test - ISO 6508-1, (2023) [54].



Donde: X= Tiempo, Y= Posición del penetrador, 1= Profundidad de indentación con F_0 , 2= Profundidad de indentación con F_1 , 3= Recuperación elástica después de eliminar F_1 , 4= Profundidad indentación permanente, 5= Superficie de la muestra, 6= Referencia para medición, 7= Posición de indentador y 8= Curva de profundidad de indentación.

Las probetas deben cumplir con los requisitos establecidos por la norma para garantizar resultados precisos. Su superficie debe ser lisa, uniforme y libre de impurezas o lubricantes, a menos que la normativa indique lo contrario. La preparación debe evitar alteraciones en la dureza causadas por calentamiento excesivo o trabajo en frío.

El espesor mínimo de las probetas debe ser 15 veces la profundidad de la indentación para penetradores de bola, salvo que se demuestre que un menor espesor no afecta la medición. Además, no deben presentarse deformaciones en la parte posterior después del ensayo. Al seleccionar el material de las probetas, se deben tener en cuenta su función y sus propiedades físicas y químicas.



CAPÍTULO III

3 MATERIALES Y MÉTODOS

En el presente capítulo se describen los materiales y la metodología utilizada en el diseño y la construcción de un horno de tratamientos térmicos con control electrónico. El diseño considera las principales variables que afectan su desempeño térmico y estructural. Es fundamental seleccionar adecuadamente los materiales refractarios y aislantes, realizar un cálculo preciso del flujo de calor, dimensionar correctamente las resistencias eléctricas y garantizar la selección y configuración óptima del sistema de control de temperatura.

Se detalla el proceso de construcción y preparación de probetas para ensayos de dureza, con base en la norma ISO 6508 que especifican los equipos e insumos empleados. Mediante un enfoque experimental y documental, se establecen los pasos necesarios para realizar de los tratamientos térmicos y los ensayos de dureza.

3.1 Materiales

El diseño del horno permite soportar altas temperaturas y cambios bruscos sin comprometer la integridad estructural de sus componentes. La selección de materiales garantiza refractariedad, resistencia mecánica y protección contra la corrosión.

El análisis de propiedades químicas, físicas, eléctricas y mecánicas asegura una instalación, operación y mantenimiento eficientes. A partir de un estudio de hornos industriales y tratamiento térmico, se establecieron los siguientes parámetros: el horno tiene una temperatura regulable hasta 1200 C, con una operación constante a 1000 C. La temperatura externa máxima es de 40 C, conforme a las normas ISO 13732-1 [55]. Según [56] la temperatura ambiente en Ibarra es de 16 C y el equipo requiere una alimentación de 220 V.

Los materiales seleccionados cumplen funciones específicas en la construcción del horno para mejorar su eficiencia térmica y resistencia estructural. A continuación, se presentan los materiales utilizados junto con sus aplicaciones y propiedades.

3.1.1 Ladrillo Aislante Liviano de Mullita

El ladrillo de mullita se utilizó como respaldo de los ladrillos más densos en la cámara interna del horno, forma la primera capa de la pared. Su capacidad para minimizar pérdidas de



calor y su facilidad de mecanizado permitieron crear canales para la instalación segura de las resistencias. Las propiedades del material se presentan en la Tabla 2.

Tabla 2

Propiedades del ladrillo de mullita

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Calor específico	0.8	kJ/kg K
	Densidad aparente	800	kg/m ³
	Dimensiones (LxAxE)	230 x 114 x 64	mm
Térmicas	Temperatura equivalente	1699	C
	Temperatura máxima	1350	C
	Conductividad térmica	0.20	W/mK
Química	Alúmina, Al ₂ O ₃	48	%
	Dióxido de silicio, SiO ₂	50	%
	Trióxido de hierro, Fe ₂ O ₃	1	%
Imagen			

Nota: Adaptado de Maquinarias Henriques S.A., (2021) [57],

3.1.2 Ladrillo Refractario con Alto Contenido de Alúmina

El ladrillo de alúmina se seleccionó para conformar la segunda capa de la pared del horno. Este material proporciona estabilidad térmica y resistencia a la corrosión. A continuación, la Tabla 3 presenta las propiedades del ladrillo de alúmina.

Tabla 3

Propiedades del ladrillo de alúmina

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Calor específico	0.96	kJ/kg K
	Densidad aparente	2450	kg/m ³
	Dimensiones (LxAxE)	200x100x64	mm
Térmicas	Temperatura equivalente	1820	C
	Temperatura máxima	1600	C
	Conductividad térmica	0.47	W/mK
Química	Alúmina, Al ₂ O ₃	61.8	%
	Dióxido de silicio, SiO ₂	33.7	%
	Dióxido de titanio, TiO ₂	2.3	%
Imagen			

Nota: Adaptado de AQ 60 Ladrillos refractarios, (2021) [23].



3.1.3 Mortero Refractario

El mortero refractario VESUVIUS se empleó para estabilizar la estructura de las paredes y fijar los ladrillos densos, además protege el equipo de la penetración de escorias, gases y líquidos corrosivos. Sus propiedades se presentan en la Tabla 4.

Tabla 4

Propiedades del mortero refractario

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Máximo tamaño del grano	1 a 0.5	mm
Térmicas	Temperatura equivalente	1649	C
	Temperatura máxima	1500	C
Química	Alúmina, Al ₂ O ₃	45	%
	Dióxido de silicio, SiO ₂	45	%
	Óxido de hierro, Fe ₂ O ₃	2	%
Imagen			

Nota: Adaptado de CONCRAX 1700 Concreto refractario, (2021) [58].

3.1.4 Mantas de Fibras Refractarias Cerámicas

La manta cerámica se utilizó para aislar el revestimiento del horno y forma la tercera capa del sistema. Sus características de protección térmica mejoran la eficiencia del equipo. Las especificaciones de su desempeño se muestran en la Tabla 5.

Tabla 5

Propiedades de manta cerámica

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Calor específico	1.13	kJ/kg K
	Densidad aparente	800	kg/m ³
	Dimensiones (LxAxE)	7620x610x500	mm
Térmicas	Temperatura equivalente	1400	C
	Temperatura máxima	1260	C
	Conductividad térmica	0.22	W/mK
Química	Alúmina y silicato, Al ₂ O ₃ + SiO ₂	99	%
Imagen			

Nota: Adaptado de Modelo de manta de fibra de vidrio especificado HY-404, (2024) [25].



3.1.5 Chapa Metálica de Acero Inoxidable

El acero inoxidable AISI 304 se seleccionó como chapa metálica por su facilidad de conformado en frío y soldabilidad, esto lo hace adecuado para recubrir el horno y proteger sus componentes internos. Sus características se detallan en la Tabla 6.

Tabla 6

Propiedades del acero AISI 304

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Calor específico	0.5	kJ/kg K
	Conductividad térmica	0.15	W/mK
	Densidad aparente	8000	kg/m ³
	Dimensiones (LxAxE)	1220x2440x1	mm
Mecánica	Resistencia a la tracción	520	N/mm ²
	Dureza	81.7	HRC
Química	Cromo, Cr	18 a 20	%
	Manganeso, Mn	2	%
	Níquel, N	8 a 10.5	%
Imagen			

Nota: Adaptado de DIPAC, pág. 56, (2022) [28].

3.1.6 Resistencia tipo Bobina de Alambre Kanthal A-1

Las resistencias de alambre Kanthal A-1 se utilizaron por su eficiencia en sistemas de calentamiento, estas permiten la conversión de energía eléctrica en calor y logra elevar la temperatura en la cámara. Sus propiedades se detallan en la Tabla 7.

Tabla 7

Propiedades resistencia tipo bobina

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Coefficiente de resistividad	1.04	Ct
	Conductividad térmica	27	W m ⁻¹ K ⁻¹
	Emisividad	0.70	---
Térmicas	Temperatura equivalente	1500	C
	Temperatura máxima	1400	C
Química	Hierro, Fe	69.52	%
	Cromo, Cr	23.5	%
	Aluminio, Al	5.8	%
Imagen			

Nota: Adaptado de KANTHAL A-1, (2024) [26].



3.1.7 Sensor de Temperatura

La termocupla tipo K, de alta precisión y respuesta rápida, le proporciona información en tiempo real al controlador, lo que permite el monitoreo térmico del horno. Su diseño de bayoneta facilita la instalación y extracción. Las especificaciones se detallan en la Tabla 8.

Tabla 8

Propiedades Termocupla tipo K

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Físicas	Dimensiones del tubing (LxAxBASE)	215x7x12.7	mm
	Longitud de aislamiento	162	mm
	Diámetro del cable	3.0	mm
Térmicas	Rango de temperatura	-50 a 1300	C
	Tiempo de respuesta	1 a 2	s
Desempeño	Precisión	±0.05	C
Imagen			

Nota: Adaptado de Termopar o termocupla tipo K Serie PBTk, (2022), [59].

3.1.8 Controlador de Temperatura

El controlador TP7-MC10 se empleó para regular la temperatura con precisión, esto logra una gestión eficiente, lo que garantiza condiciones constantes durante el proceso. Sus características técnicas se detallan en la Tabla 9.

Tabla 9

Propiedades controlador

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Temperatura operación	0 a 50	C
	Dimensiones (LxA)	72x72	mm
	Peso	0.4	kg
Mecánica	Capacidad del relé	250	V
	Salida de SSR	24	V
Eléctricas	Fuente de alimentación	100 – 240	V
Desempeño	Frecuencia de muestreo	2	s
Imagen			

Nota: Adaptado de CONTROLADOR DE TEMPERATURA INTELIGENTE SERIE TP, (2022) [60].



3.1.9 Relé Sólido de Alta Intensidad

El relé sólido MAXWELL reguló el flujo de energía en el circuito, lo que permitió garantizar un control óptimo del sistema eléctrico y mejorar su rendimiento. Las propiedades del componente se presentan en la Tabla 10.

Tabla 10

Especificaciones relé sólido

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Temperatura de operación	-30 a 75	C
	Dimensiones (LxAxE)	57x46x23	mm
Eléctrica	Capacidad	60 - 480	A
	Corriente de control	3 a 32	VDC
Desempeño	Velocidad de conmutación	10	ms

Imagen



Nota: Adaptado de Relé de estado sólido con carga CA y entrada de CC, (2022) [61].

3.1.10 Disyuntor tipo Riel

El disyuntor Easy9 protege el sistema ante sobrecargas y cortocircuitos al interrumpir el flujo de corriente ante fallos eléctricos. Sus propiedades se muestran en la Tabla 11.

Tabla 11

Propiedades del disyuntor

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Físicas	Dimensiones (LxAxE)	81x36x66.5	mm
	Número de polos	2	---
Eléctrica	Corriente	50	A
	Tensión	400	V
	Frecuencia	50/60	Hz
Desempeño	Corte de cortocircuitos	4500	A
	Vida mecánica y eléctrica	20000	Ciclos

Imagen



Nota: Adaptado de Interruptores automáticos NXB-63 C32, (2024) [62].



3.1.11 Interruptor Selector de dos Posiciones

El selector de dos posiciones EBASE controla el encendido y apagado del horno mediante el giro de su perilla. Sus características se presentan en la Tabla 12.

Tabla 12

Propiedades del selector de dos posiciones

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Diámetro	22.5	mm
	Dimensiones (LxAxE)	47x30x68	mm
	Peso	0.095	kg
Mecánica	Tipo de operador	Sostenido	---
	Posiciones	2 de 90	---
Eléctricas	Corriente convencional	10	A

Imagen



Nota: Adaptado de Interruptor selector negro Ø 22mm, 2 posiciones, 1 NA, (2024) [63].

3.1.12 Indicador Luminoso

El indicador luminoso AD22-22DS/G funciona como luz piloto para señalar el estado operativo del sistema. Al encenderse, proporciona una señal visual del funcionamiento del horno. Sus especificaciones se detallan en la Tabla 13.

Tabla 13

Propiedades de la luz piloto

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Eléctrica	Alimentación	220	VAC
	Corriente	20	mA
	Voltaje	1500	VCA
	Frecuencia	50 a 60	Hz
Físicas	Diámetro	22	mm
	Peso	0.0212	kg
	Terminales	2	---

Imagen



Nota: Adaptado de AD22-22DS - Foco Piloto LED, (2020) [64].



3.1.13 Acero ASTM A36

El acero A36 se utilizó en la fabricación de las probetas por su conformabilidad y resistencia, adecuadas para los procesos experimentales. Su comportamiento fue evaluado bajo condiciones controladas. Las propiedades del material se presentan en la Tabla 14.

Tabla 14

Propiedades del acero ASTM A36

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Densidad	7.750	g/cm^3
	Conductividad térmica	41	W/mC
	Dimensiones (LxAxE)	1219x2438x2 a 12	mm
Mecánica	Esfuerzo máximo	400 a 550	MPa
	Alargamiento a la rotura	20	%
Química	Carbono, C	0.25 a 0.29	%
	Silicio, Si	0.40	%
	Manganeso, Mn	0.80 a 1.20	%
	Cobre, Cu	0.20	%
Imagen			

Nota: Adaptado de Láminas en caliente, Acero A36, [65].

3.1.14 Cámara Térmica

La cámara portátil IR0019 permite realizar mediciones térmicas en tiempo real, muestra los resultados en la pantalla y permite identificar variaciones de temperatura [66]. Este dispositivo infrarrojo se utilizó para registrar la temperatura en distintos puntos del horno durante su funcionamiento. Las propiedades del equipo se detallan en la Tabla 15.



Tabla 15

Propiedades de la cámara térmica

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Pantalla de visualización	8	cm
	Dimensiones (LxAxH)	90 x 105 x 223	mm
	Peso	0.4	kg
Desempeño	Rango de medición	-20 a 430	C
	Precisión	±5	C
	Resolución de imagen	640 x 480	px
	Frecuencia de imágenes	9	Hz

Imagen



Nota: Adaptado de PerfectPrime, Cámara térmica IR0019, (2020) [66].

3.1.15 Estereomicroscopio

En el Laboratorio de Biología de la Universidad Técnica del Norte, el estereomicroscopio permite realizar observaciones detalladas de muestras y objetos. Este equipo se utilizó para observar la superficie de las probetas durante el proceso de lijado [67]. La Tabla 16 detalla las características del equipo.

Tabla 16

Propiedades del estereomicroscopio

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Marca	MOTIC	---
	Modelo	ST-30	---
	Inclinación	45	---
	Dimensiones (LxAxH)	190x115x285	mm
	Peso	2.7	kg
Ópticas	Objetivos	2X – 4X	---
	Enfoque	Grueso, con suavidad	---

Imagen



Nota: Adaptado de ST-30C-2L00, [67].

3.1.16 Durómetro para Pruebas Rockwell

El durómetro mide la dureza del acero mediante el ensayo Rockwell. Aplica una fuerza controlada y utiliza distintos penetradores según la escala requerida. Su mecanismo de alta



precisión determina la profundidad del indentador en el material [68]. Las especificaciones del equipo se presentan en la Tabla 17.

Tabla 17

Propiedades del durómetro

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Físicas	Modelo	8 BLP	---
	Serial	315	---
	Dimensiones (LxAxE)	600x350x550	mm
	Peso	44	kg
	Tipos de indentadores	Diamante y bolas de acero	---
	Penetradores	1/16 y 1/8	pulg
Desempeño	Apreciación	0.5	HR
	Escala	A, B, C, D, F, E, H	---
Mecánicas	Fuerza preliminar	98	N
	Carga de prueba	588, 980, 1471k	N
	Duración de carga	2 a 5	s

Imagen



3.2 Metodología

La Figura 12 ilustró la secuencia lógica seguida para el diseño, construcción, control y validación del funcionamiento de un horno para tratamientos térmicos superficiales, mediante un diagrama de flujo que organizó el proceso en etapas sucesivas. El procedimiento comenzó con la modelación matemática del comportamiento termodinámico del horno, donde se realizaron cálculos de diseño térmico y selección de los elementos calefactores.

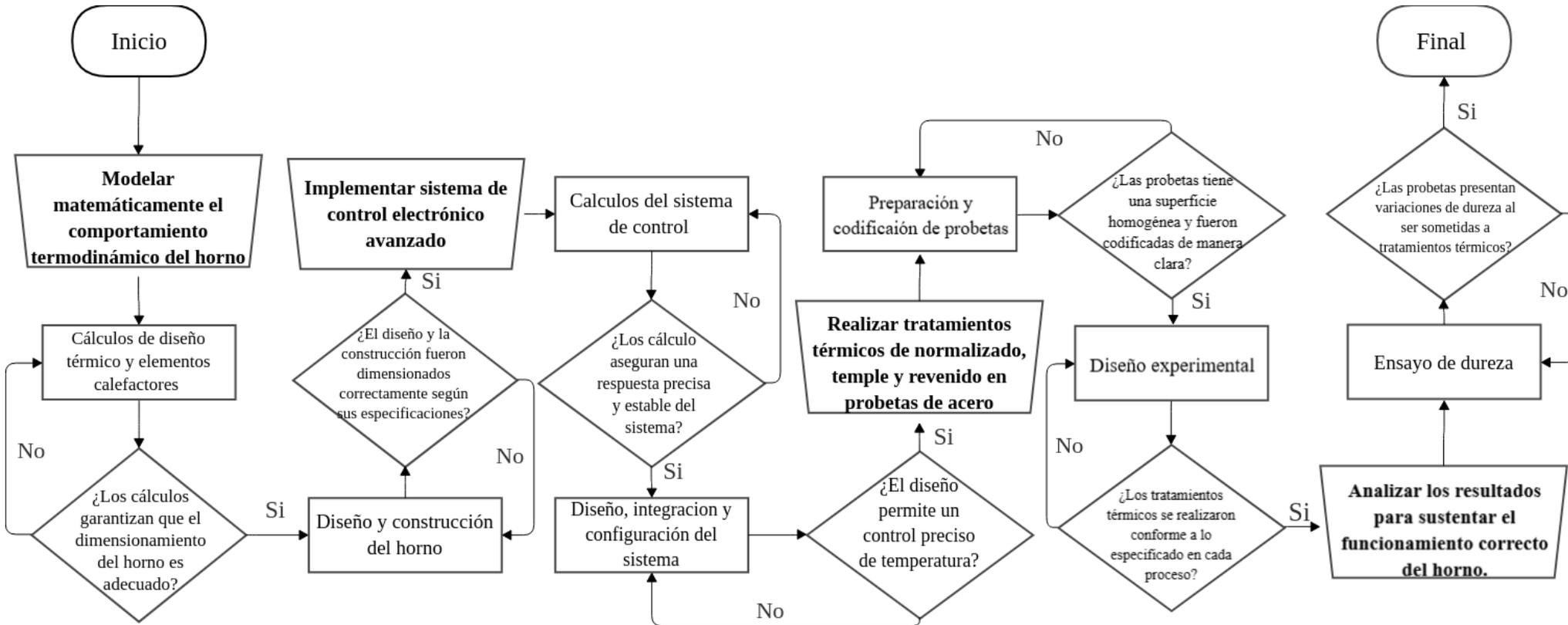
En la etapa de control electrónico, se evaluó la conformidad del diseño y la construcción con las especificaciones técnicas. Luego, se ejecutaron los cálculos del sistema de control y, tras verificar la precisión y estabilidad de la respuesta, se procedió a su integración y configuración.

Después, se prepararon y codificaron las probetas, asegurando una superficie homogénea e identificación clara. Luego, se ejecutaron los tratamientos térmicos en las probetas de acero. Se comprobó que el diseño del horno permitiera un control preciso de la temperatura. A continuación, se verificó la conformidad de los tratamientos térmicos con los parámetros establecidos.

Finalmente, se efectuó el ensayo de dureza y se analizaron los resultados para sustentar el correcto funcionamiento del horno.



Figura 12
Diagrama de flujo





3.2.1 Cálculos de Diseño Térmico

El análisis térmico del horno considera la transferencia de calor por conducción, convección y radiación. El cálculo incluye la masa total del horno, la potencia necesaria para alcanzar la temperatura de trabajo y las pérdidas térmicas. También se evalúa la eficiencia térmica para optimizar el diseño.

El diseño estructural se basa en una configuración prismática con cuatro paredes verticales y dos horizontales, lo que facilita su fabricación. El cálculo de los espesores del revestimiento se realiza según la transferencia de calor a través de la pared, conforme a los parámetros definidos en el apartado 3.1. Las capas se disponen para soportar la temperatura máxima interna, con materiales de menor conductividad térmica y densidad hacia el exterior. La Tabla 18 resume los datos utilizados en este análisis.

Tabla 18

Simbología para el flujo de calor

Simbología	Descripción	Unidades
Q	Transferencia de calor	W
e_M	Espesor del ladrillo aislante liviano de mullita	m
e_{Al}	Espesor del ladrillo con alto contenido alúmina	m
e_F	Espesor de la manta de fibras refractarias cerámicas	m
e_A	Espesor de chapa metálica de acero inoxidable AISI 304	m
$T_{Interior}$	Temperatura interna de la cámara del horno	K
T_1	Temperatura entre L_1 L Liviano y L_2 L Alúmina	K
T_2	Temperatura entre L_2 L Alúmina y L_3 M Cerámica	K
T_3	Temperatura entre L_3 M Cerámica y L_4 C Metálica	K
T_4	Temperatura externa del horno	K
$T_{Ambiente}$	Temperatura ambiente	K

- **Revestimiento del horno: espesores y temperaturas**

El cálculo del espesor y la temperatura en cada capa del horno se basa en la conducción térmica y la disipación de calor por convección y radiación hacia el ambiente. A partir de una temperatura interna de 1200 C y una temperatura ambiente de 16 C, se realizaron iteraciones hasta obtener una diferencia menor al 1 % entre resultados consecutivos. El modelo de flujo de calor utilizado se presenta en el desarrollo, y su código se encuentra en el Anexo 1.

Primero se calcula el flujo de calor por conducción se calcula mediante la Ecuación 8 en estado estacionario.



$$Q_C = \frac{(T_{Interior} - T_4)}{R_{Total}}$$

Ecuación 8

Donde la resistencia térmica total es la suma de las resistencias de cada material, calculadas según la Ecuación 9.

$$R_{Total} = \sum \frac{L_x}{k_x}$$

Ecuación 9

Donde L_x = Espesor de cada capa (m) y k_x = Conductividad térmica (W/mK).

Es necesario considerar las pérdidas de calor hacia el ambiente por convección y radiación.

Se calcula con la Ecuación 10.

$$Q_{CR} = (h_c + h_r)(T_4 - T_{Ambiente})$$

Ecuación 10

Donde T_4 = Temperatura externa del horno (K) h_c = Coeficiente de convección del aire (W/m²K) y h_r = Coeficiente de transferencia calor por radiación (W/m²K), este valor se calcula la Ecuación 11.

$$h_r = \varepsilon * \sigma * ((T_4 + 273.25)^2 + (T_{Ambiente} + 273.15)^2) * ((T_4 + 273.25) + (T_{Ambiente} + 273.15))$$

Ecuación 11

Donde ε = Emisividad del acero y σ = Constante de Stefan-Boltzmann (W/m²K⁴)

Para continuar, se establece el equilibrio térmico entre las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación. Este balance se expresa con la Ecuación 12.

$$Q_C = Q_{CR}$$

Ecuación 12

Después se despeja T_4 , esto da como resultado la Ecuación 13. El cálculo de T_4^{nuevo} se realiza de manera iterativa. La iteración termina cuando el valor calculado es lo más próximo a la temperatura superficial asumida.

$$T_4^{nuevo} = \frac{Q_{CR}}{h_c + h_r} + T_{Ambiente}$$

Ecuación 13

La iteración continúa hasta que el error relativo sea inferior al 1%, como muestra la Ecuación 14.

$$\left| \frac{T_4^{nuevo} - T_4}{T_4^{nuevo}} \right| < 0.01$$

Ecuación 14

Finalmente, la temperatura en cada interfaz del revestimiento se determina con la Ecuación 15. Este procedimiento permite conocer la distribución de temperaturas del revestimiento y evaluar la efectividad del aislamiento térmico.



$$T_j = T_{Interior} - Q_c \sum_{i=1}^j \frac{L_x}{k_x}$$

Ecuación 15

Con la Ecuación 16 se calcula la diferencia de temperatura entre las capas permite conocer la distribución de la caída térmica, esto es clave para determinar el flujo de calor, evaluar el rendimiento térmico y optimizar el aislamiento. Esto ayuda a identificar qué materiales ofrecen mayor resistencia al flujo de calor y mejorar la eficiencia del diseño.

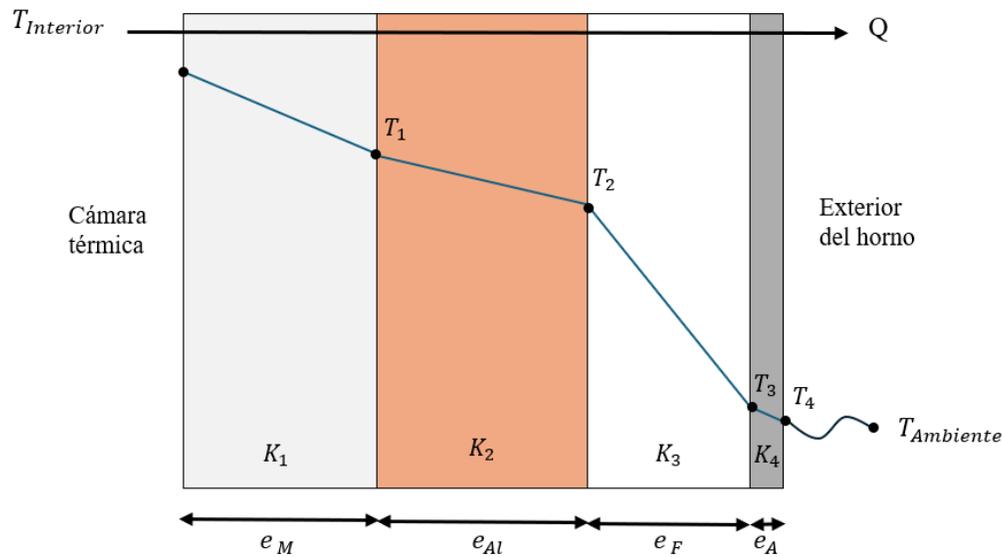
$$\Delta T = T_{Inicial} - T_{Final}$$

Ecuación 16

La definición del espesor de las capas busca optimizar el aislamiento sin aumentar el número capas de ladrillos refractarios, ya que esto incrementaría el peso del horno. Las capas se disponen para conservar el calor en la cámara interna. Como muestra la Figura 13, la estructura está compuesta por dos capas de ladrillo refractario, tres capas de fibra cerámica y un recubrimiento exterior de chapa metálica.

Figura 13

Configuración de las paredes del horno



El modelo térmico del horno se basa en un análisis unidimensional en estado estable de una pared compuesta. La conducción a través del revestimiento y la convección-radiación desde la superficie externa al ambiente son los mecanismos predominantes. Se asume una temperatura interna uniforme, lo que permite despreciar el gradiente entre la cámara y la superficie del ladrillo



interno. El sistema se representa con dos resistencias térmicas en paralelo, determinadas mediante cálculos específicos. Los cálculos termodinámicos se presentan a continuación y el código de ejecución se muestra en el Anexo 2.

- **Transferencia de calor por conducción**

La transferencia de calor por conducción en estado estacionario emplea la ley de Fourier para calcular la cantidad de calor que atraviesa un material homogéneo. La Ecuación 1 expresa matemáticamente este fenómeno.

Determinar el área efectiva permite estimar la cantidad total de calor transferido. La Ecuación 17 define esta área como la superficie externa del horno, donde ocurre la transferencia por conducción. El horno cuenta con seis caras externas, de las cuales se consideran pares opuestos con igual área, por lo que se multiplica por dos. Las superficies internas no se incluyen, ya que no intervienen en la pérdida de calor hacia el exterior.

$$A_T = 2 * (L_e A_e + L_e A L_e + A_e A L_e) - 2 * (l_i a_i + l_i a l_i + a_i a l_i) \quad \text{Ecuación 17}$$

Donde L_e =Longitud externa del horno, A_e =Ancho, $A L_e$ =Alto externo y L_i =Longitud interna de la cámara de inducción, A_i =Ancho interno $A L_i$ =Alto interno, todas en (m).

Cada capa genera resistencia al flujo de calor. La Ecuación 18 calcula la resistencia térmica total del sistema como la suma de todas las resistencias térmicas individuales.

$$R_{Total} = \sum \frac{L_x}{k_x * A_T} \quad \text{Ecuación 18}$$

La conductividad térmica equivalente indica la capacidad de conducción térmica del conjunto de materiales como si fuera un material homogéneo, se calcula con la Ecuación 19.

$$k = \frac{L}{R_{Total} * A_T} \quad \text{Ecuación 19}$$

- **Perdidas de calor por convección**

La transferencia de calor por convección natural ocurre desde la superficie externa del horno hacia el aire del ambiente. La Ecuación 2 determina esta pérdida de calor.

Calcular la longitud característica permite estimar los efectos de la convección en una superficie irregular. Esta longitud describe el flujo térmico, se determina con la Ecuación 20.



$$L_c = \frac{A_T}{4\sqrt{A_T}}$$

Ecuación 20

El coeficiente volumétrico de expansión térmica describe cómo varía la densidad del aire con la temperatura. Su cálculo se basa en la Ecuación 3.

Con estos valores, la Ecuación 4 permite determinar el número de Grashof, que describe la tendencia del fluido a generar flujo convectivo por diferencia de temperatura. Este número mide la relación entre las fuerzas de flotabilidad y la viscosidad del flujo.

Los datos sobre la densidad, viscosidad, número de Prandtl, conductividad térmica, emisividad y calor específico del aire fueron obtenidos de [69].

El número de Nusselt mide la eficiencia de un fluido en la transferencia de calor por convección en comparación con la conducción. Su cálculo se realiza mediante la Ecuación 5.

El número de Prandtl determina la relación entre el transporte de calor y el transporte de cantidad de movimiento en el fluido, siempre que se cumpla la condición $G_r * P_r < 10^9$

Finalmente, el coeficiente de convección, que establece la cantidad de calor transferido desde la superficie al fluido, según calcula según la Ecuación 6.

- **Pérdidas de calor por radiación**

Las pérdidas de calor por radiación ocurren cuando un material a temperatura finita emite energía en forma de ondas infrarrojas. Este fenómeno se describe mediante la Ecuación 7, y calcula el calor transferido desde la superficie del horno hacia el ambiente y la probeta en su interior.

Las pérdidas por radiación a través de las aberturas se calcularon a partir de un orificio de 0.001 m de diámetro, el cual permite aliviar la presión interna y genera pérdidas térmicas. El área de dicha abertura se obtuvo mediante la Ecuación 21.

$$A_{Abertura} = (A_e + 0.001 \text{ m}) * (L_e) - (A_e * L_e)$$

Ecuación 21

La radiación térmica que escapa a través de las aberturas del horno se evalúa con la ecuación de Stefan-Boltzmann, con base en la diferencia de temperatura entre el interior del horno y el ambiente. Este calor se pierde directamente por radiación sin atravesar las paredes aisladas del horno, como se expresa en la Ecuación 22.

$$Q_{PA} = \varepsilon * \sigma * A_{Aberturas} * (T_{Interior}^4 - T_{Ambiente}^4)$$

Ecuación 22



- **Pérdidas de calor hacia la probeta**

El calor transferido a la probeta metálica en el interior del horno por conducción se calcula mediante la Ecuación 23. Esta relación describe la energía absorbida por la probeta en función de su capacidad calorífica, se considera la masa y el calor específico del acero A36.

$$Q_A = \frac{m * Cp * (T_{Interior} - T_{Ambiente})}{t} \quad \text{Ecuación 23}$$

Donde t =Tiempo para calentar la pieza (s) y Cp =Calor específico (kJ/kg K)

Según [70] el calor específico representa la cantidad de energía requerida para incrementar la temperatura de una sustancia en una unidad de grado Celsius o Kelvin.

- **Pérdidas totales de calor en el horno**

El cálculo de la cantidad total de calor perdido en el horno resulta de la suma de las pérdidas por conducción, convección, radiación, aberturas y el calor absorbido por la probeta. La Ecuación 24 expresa esta relación.

$$Q_{PT} = Q_C + Q_{cvT} + Q_r + Q_A + Q_{PA} \quad \text{Ecuación 24}$$

- **Cálculo energético del horno**

El cálculo energético comienza con la estimación de la potencia requerida, basada en las pérdidas térmicas y la energía suministrada por las resistencias. Para garantizar una operación segura, se aplica un factor de seguridad de 3, conforme a la norma NFPA 86, que establece estándares de seguridad para hornos industriales y márgenes adecuados para garantizar una operación segura [71]. La Ecuación 25 presenta esta relación, que permite dimensionar adecuadamente el sistema calefactor.

$$P_H = Q_{PT} * 3 \quad \text{Ecuación 25}$$

La energía total necesaria para mantener la temperatura estable se calcula en el siguiente paso. La Ecuación 26 combina las pérdidas totales de calor y la potencia del horno para determinar la energía requerida para el funcionamiento continuo del sistema.



$$Q_{ET} = Q_{Pt} + P_H$$

Ecuación 26

Dentro de la cámara de calentamiento, el aire absorbe energía térmica. La Ecuación 27 calcula el calor retenido por el aire al aumentar su temperatura.

$$Q_{Aire} = m_a * C_{pa} * (T_{Interior} - T_{Ambiente})$$

Ecuación 27

La masa del aire en la cámara del horno se se obtiene del producto entre su densidad y el volumen interno. Este valor indica la cantidad de aire a calentar y permite estimar la energía requerida para alcanzar la temperatura objetivo, según la Ecuación 28. La densidad del aire a 16C [69], se obtiene mediante interpolación entre dos densidades conocidas, y el volumen se determina a partir de las dimensiones del horno.

$$m_a = \rho_{Aire\ Cámara} * V_c$$

Ecuación 28

El volumen de la cámara interna del horno, correspondiente al espacio donde el aire se encuentra contenido, se calcula con la Ecuación 29. Este valor es estimar la cantidad de aire que interactúa con las fuentes de calor y la energía para calentar dicho volumen.

$$V_c = l_i * a_i * al_i$$

Ecuación 29

La densidad del aire a 16C se calcula con interpolación entre dos valores de densidad conocidos a diferentes temperaturas. Este parámetro influye directamente en la cantidad de calor que puede absorber el aire. La Ecuación 30 describe este proceso de interpolación.

$$\rho_{Aire\ Cámara} = \rho_1 + \frac{(16 - T_1)(\rho_2 - \rho_1)}{(T_2 - T_1)}$$

Ecuación 30

El tiempo necesario para que el aire en la cámara del horno alcance la temperatura deseada desde la temperatura ambiente se determina con la Ecuación 31. Este cálculo integra la variación de temperatura en función del calor aportado y la energía disponible.

$$t_a = \int_{T_{Ambiente}}^{T_{Interior}} \frac{m_a * C_{pa} * dPc}{Q_{ET}}$$

Ecuación 31

El calor total necesario para calentar el horno se calcula al tomar en cuenta el calor absorbido por el aire y las pérdidas térmicas. La Ecuación 32 expresa este valor como la suma del



calor requerido para compensar las pérdidas térmicas y el calor adicional necesario para mantener la temperatura estable.

$$Q_{tt} = \left(\frac{Q_{Aire} + Q_{PT}}{h_r} \right) + Q_{PT} \quad \text{Ecuación 32}$$

Donde h_r = Tiempo necesario para calentar la pieza (s).

La eficiencia del horno se calcula con la Ecuación 33, que mide la capacidad del sistema para convertir la energía suministrada en calor útil y minimiza el consumo energético.

$$n = \left(\frac{Q_{tt}}{Q_{tt} + \left(\frac{Q_{PT} + Q_{PA}}{10} \right)} \right) * 100\% \quad \text{Ecuación 33}$$

La masa del horno se obtiene al sumar las masas de cada material. La Ecuación 34 calcula estas masas como el producto entre el volumen de cada capa por su densidad.

$$m_H = p_x * V_x \quad \text{Ecuación 34}$$

Donde p_x = Densidad de cada material (kg/m^3) y V_x = Volumen de cada capa (m^3).

Para cada material se calcula el volumen individual. El volumen del acero se obtiene con la adición el espesor del material a las dimensiones internas y la sustracción el volumen interno, como se indica en la Ecuación 35. El volumen de la fibra cerámica considera el espesor combinado con el del acero, calculado con la Ecuación 36. El volumen de la alúmina se obtiene con la suma de los espesores del acero, la fibra cerámica y la alúmina, según la Ecuación 37. Finalmente, el volumen de la mullita se calcula como la diferencia entre los volúmenes de los demás materiales y el volumen externo del horno, según la Ecuación 38.

$$V_A = (l_i + 2 e_A) * (a_i + 2 e_A) * (al_i + 2 e_A) - V_{Interno} \quad \text{Ecuación 35}$$

$$V_F = (l_i + 2 (e_A + e_F)) * (a_i + 2(e_A + e_F)) * (al_i + 2(e_A + e_F)) - (V_{Interno} + V_A) \quad \text{Ecuación 36}$$

$$V_{Al} = (l_i + 2 (e_A + e_F + e_{Al})) * (a_i + 2(e_A + e_F + e_{Al})) * (al_i + 2(e_A + e_F + e_{Al})) - (V_{Interno} + V_A + V_F) \quad \text{Ecuación 37}$$

$$V_M = V_{Externo} - (V_{Interno} + V_A + V_F + V_{Al}) \quad \text{Ecuación 38}$$

Donde V_A = Volumen del acero, V_F = Volumen de la fibra cerámica, V_{Al} = Volumen de la alúmina, V_M = Volumen de la mullita, todos en (m^3) y e_A = Espesor del acero, e_F = Espesor de la fibra cerámica, e_{Al} = Espesor de la alúmina, todos en (m).

3.2.2 Cálculos de Elementos Calefactores



El diseño térmico de los elementos calefactores se basa en la potencia, el consumo de corriente y la resistencia total. El diámetro del hilo se selecciona en función de las variaciones de resistencia con la temperatura. El horno cuenta con dos resistencias eléctricas que alcanzan 1200 C. La potencia necesaria se calcula con base en las pérdidas térmicas, la energía absorbida por las paredes y el calor necesario para calentar las probetas, lo que asegura la estabilidad térmica. La Ecuación 39 determina la potencia requerida para mantener la temperatura interna del horno.

$$Q_{Potencia} = \frac{T_{Interior} - T_{Ambiente}}{R_{Total}} \quad \text{Ecuación 39}$$

La corriente eléctrica necesaria para el funcionamiento del horno se calcula con la Ecuación 40. Esta expresión determina la cantidad de corriente eléctrica que circula por el sistema en función de la potencia y el voltaje aplicado.

$$I = \frac{P_H}{V} \quad \text{Ecuación 40}$$

La resistencia eléctrica efectiva del sistema se calcula la Ecuación 41, con la condición de que las resistencias están conectadas en paralelo.

$$R_{eq} = \frac{P_H}{I^2} \quad \text{Ecuación 41}$$

Se considera que las resistencias eléctricas están en paralelo, la resistencia total del sistema se determina con la Ecuación 42, en función del efecto combinado de las resistencias.

$$R_s = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad \text{Ecuación 42}$$

Donde R_1 y R_2 = Resistencias eléctricas, ambas en (Ω).

- **Resistencia eléctrica en función de la temperatura**

La resistencia en caliente, que representa el comportamiento del material a altas temperaturas durante el funcionamiento, se determina con la Ecuación 43.

$$R_{cal} = R_{eq} \quad \text{Ecuación 43}$$



Mientras tanto, la resistencia a temperatura ambiente se evalúa por medio de la Ecuación 44, lo que permite estimar el desempeño del alambre en condiciones normales.

$$R_{amb} = \frac{R_{cal}}{Ct} \qquad \text{Ecuación 44}$$

- **Características geométricas de la espira**

El diámetro del hilo, calculado con la Ecuación 45, es un parámetro clave en el diseño de los elementos calefactores. Un mayor diámetro mejora la distribución térmica, mientras que uno menor incrementa la resistencia eléctrica y la acumulación de calor.

$$D_h = \frac{Q_{Potencia}^2 * Ct}{V^2 * p} \qquad \text{Ecuación 45}$$

Donde p = Carga específica (W/cm²) y Ct = Coeficiente de resistividad (Ω m/K). La resistividad eléctrica depende de la composición del material y la temperatura, con valores obtenidos de la ficha técnica del KANTHAL A-1 [72].

La carga específica indica la potencia que un material puede disipar por unidad de volumen o área sin comprometer su integridad térmica. Este parámetro determina la capacidad del alambre para generar y disipar calor de forma segura, y depende de la resistividad eléctrica.

El diámetro del hilo se selecciona en función de la resistividad eléctrica, según la Ecuación 45, y valores del Manual Kanthal [73] para cumplir con los requisitos del sistema calefactor.

La longitud total radiante del hilo, calculada con la Ecuación 46, determina la extensión del material conductor necesaria para alcanzar la potencia térmica específica.

$$L_{Alambre} = \frac{Q_{Potencia}}{\pi * d * p} \qquad \text{Ecuación 46}$$

En hornos industriales que operan por encima de 1000C, la relación entre el diámetro de la espiral y el diámetro del hilo conductor debe mantenerse entre 5 y 6 mm. La Ecuación 47 calcula el diámetro externo de la espira para definir el tamaño y espacio ocupado por la espira.

$$D = 5 * d \qquad \text{Ecuación 47}$$

Donde D = Diámetro de la espiral y d = Diámetro del alambre, en (mm).



El número total de espiras se determina con la Ecuación 48, que se basa en la longitud total del alambre y el diámetro de la espiral. Esto optimiza el diseño geométrico del elemento calefactor y asegura una distribución uniforme del calor.

$$n = \frac{1000 * L_{Alambre}}{\pi * (D - d)} \quad \text{Ecuación 48}$$

Donde $L_{Alambre}$ = Longitud de las resistencias (m).

La longitud de la espira comprimida, calculada con la Ecuación 49 permite conocer el espacio mínimo requerido para su montaje.

$$L = n * d \quad \text{Ecuación 49}$$

Donde n = Número de espiras.

El paso de arrollamiento indica la separación entre espiras para evitar cortocircuitos y lograr una distribución uniforme de la radiación. Se calcula con la Ecuación 50.

$$s = 3 * d \quad \text{Ecuación 50}$$

Finalmente, la longitud de la espira extendida se determina mediante la Ecuación 51. Esta fórmula permite evaluar el espacio que ocupará el alambre una vez desplegado.

$$Le = s * n \quad \text{Ecuación 51}$$

3.2.3 *Diseño en CAD*

De acuerdo con los materiales adquiridos, se realizó el diseño de un horno de tratamientos térmicos superficiales mediante la utilización de un software CAD. Este horno se lo realizó con los requerimientos necesarios para ser implementado en el Laboratorio de procesos de manufactura de la carrera de Ingeniería Automotriz. Teniendo esto en consideración, además de las dimensiones de los elementos previamente establecidos, el horno de tratamientos térmicos tendrá las dimensiones que se muestran en la Tabla 19.



Tabla 19

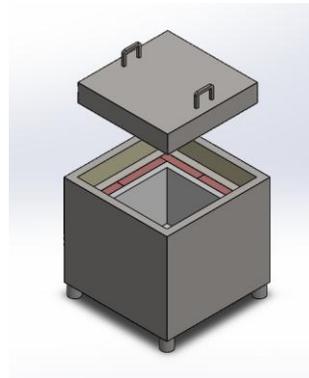
Dimensiones del horno

Propiedades	Parámetros	Valores	Unidades
Dimensiones externas	Largo	570	mm
	Ancho	490	mm
	Espesor	420	mm
Dimensiones internas	Largo	280	mm
	Ancho	200	mm
	Espesor	230	mm
Dimensiones de la tapa	Largo	570	mm
	Ancho	490	mm

El diseño del horno consta de 5 caras (1 frontal, 1 posterior, 2 laterales y 1 inferior) en donde se consideró todos los diseños de mullita, refractario, tapa, fibra cerámica y chapa metálica que se encuentran en el Anexo 4 para su ensamble. Una vez obtenido todas piezas se procede a ensamblarlos correspondientemente, teniendo como resultado final el ensamble del horno para tratamientos térmicos superficiales que se muestra en la Figura 14.

Figura 14

Ensamble del horno para tratamientos térmicos superficiales



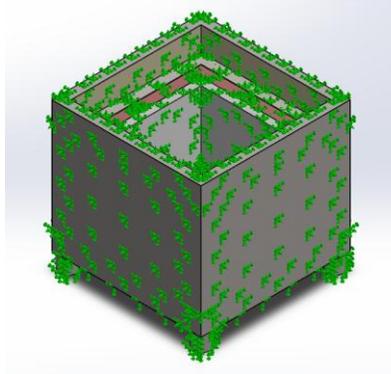
La simulación estática es un paquete de herramientas de análisis estructural que sirve para predecir el comportamiento físico real de una pieza mediante un modelo CAD. El horno de tratamientos térmicos superficiales fue fabricado con materiales que sirven para resistir altas temperaturas sin deformarse para mejorar el aislamiento térmico.



Se debe aplicar una geometría fija para restringir el movimiento a lo largo de las direcciones del horno. En este caso se tomó como geometría fija a las caras externas del horno, como muestra la Figura 15, debido a que éstas deben permanecer estáticas al momento de su funcionamiento.

Figura 15

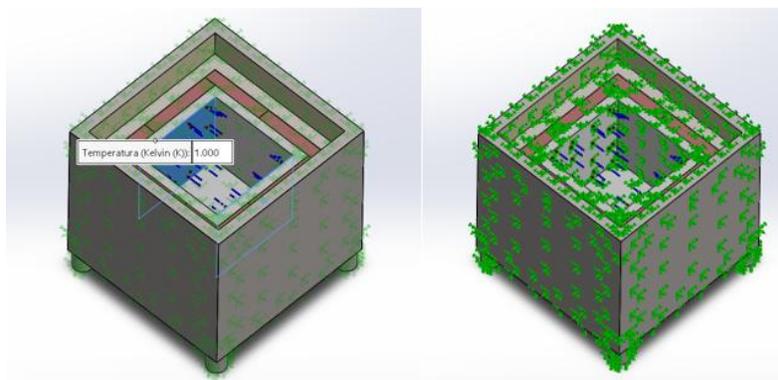
Geometría fija



De acuerdo con lo que se requiere realizar en el Horno de Tratamientos Térmicos Superficiales, se debe aplicar una temperatura de hasta 1200C en la cámara. Esta temperatura se la aplica a dos de las paredes internas de la cámara en donde se encuentran los elementos calefactores, como se indica en la Figura 16.

Figura 16

Cargas externas aplicadas y geometría fija

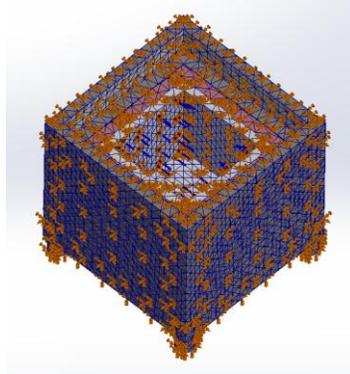




El mallado es importante para que los resultados de la simulación sean exactos y precisos. Por tanto, se utilizó una densidad de malla “Calidad alta, malla basada en curva, malla refinada en todo elemento (fina)”, como se muestra en la Figura 17.

Figura 17

Densidad de malla, cargas externas y geometría fija



3.2.4 Construcción del Horno de Tratamientos Térmicos Superficiales

Tras completar los diseños CAD y la simulación estática en el software especializado, se verificó que el dimensionamiento del horno es funcional y capaz de soportar las cargas generadas por el incremento de temperatura en la cámara interna. De esta manera, el sistema proporcionará valores de temperatura precisos con la ayuda del controlador y la termocupla tipo K.

Con el diseño finalizado y los materiales adquiridos, se procedió a la construcción del horno para tratamientos térmicos superficiales. El montaje se realizó en diferentes etapas, siguiendo la distribución de los elementos según el diseño CAD. Para la construcción de las paredes, se aplicó un procedimiento básico que permitió un montaje de manera eficiente.

En primer lugar, se preparó la mezcla de mortero refractario para asegurar que los materiales estuvieran en óptimas condiciones. Inicialmente, se agregó entre un 4% y 5% de agua para evitar la segregación del polvo durante el transporte. Luego, se incorporó gradualmente el resto del agua hasta alcanzar un total del 40% al 42%, obteniendo una mezcla uniforme. Se mezcló durante 3 a 5 minutos para evitar grumos y lograr una consistencia fluida. Si la mezcla no alcanzaba la textura deseada, se ajustaba añadiendo más agua o mortero. Finalmente, se aplicó rápidamente, manteniéndola en movimiento continuo para evitar su fraguado prematuro.



Para la base del horno, se aplicó una de mortero refractario y se colocaron los ladrillos según la disposición establecida en el diseño CAD y se asegura su nivelación con precisión. Esta primera fila fue fundamental para la estabilidad de la estructura, por lo que se verificó que los ladrillos estuvieran bien alineados y con juntas uniformes.

Las paredes laterales se levantaron en hileras, donde se aplicó mortero refractario entre los ladrillos alineándolos uniformemente. Se respetaron las dimensiones establecidas en el diseño CAD y se verificó que el espesor del mortero fuera delgado para minimizar la exposición directa al calor. La construcción de la tapa del horno siguió un procedimiento similar al de la base. Los ladrillos se dispusieron de acuerdo con el diseño CAD y se ajustaron con precisión para garantizar la hermeticidad del horno.

El recubrimiento de fibra cerámica se instaló con un espesor uniforme de 2.5 cm en las paredes y la tapa, cubriendo tanto la cara superior como la inferior para optimizar la protección térmica. El montaje comenzó con la limpieza de las superficies de ladrillos refractarios, seguido del corte y colocación de las piezas de fibra cerámica. Estas se fijaron con chapas metálicas de acero inoxidable 304, reforzadas con soldadura para garantizar su estabilidad durante la operación. Tras el montaje, se realizó una inspección final para verificar la uniformidad del recubrimiento, la firmeza de las chapas y la ausencia de huecos, lo que resultó en una cámara térmica más eficiente.

3.2.5 Controlador PID

Para el diseño del horno de tratamientos térmicos se consideró aplicar un controlador PID ya que permite tener un control más preciso y eficiente de la temperatura, sin sufrir fluctuaciones que podrían perjudicar el tratamiento térmico. Los parámetros a tomar en cuenta para el cálculo de la función de transferencia deben ser la determinación de las capacitancias de los elementos del horno, así como las potencias de consumo de alimentación eléctricas.

El análisis del sistema, al ser cerrado, se fundamentará en la Primera Ley de la Termodinámica y partirá del balance de energía correspondiente a un sistema cerrado [74]. La Ecuación 52 se obtiene a partir de la resolución del Balance de calor que se expresa en la Ecuación 64. Esta ecuación permite determinar la función de transferencia en función de las capacitancias y la potencia de alimentación que se calculan en las siguientes ecuaciones.



$$\tau \frac{d^2 T_A}{dt^2} + \frac{C_A + C_B + C_C}{C_B + C_C} \frac{dT_A}{dt} = \frac{V^2}{R} \frac{1}{(C_B + C_C)}$$

Ecuación 52

Este proceso refleja cómo los parámetros específicos afectan la derivación y simplificación de las ecuaciones para describir el sistema térmico. Las capacitancias es la capacidad que tendrán los elementos (probeta, fuente de calor y paredes) de almacenar energía.

Para determinar la C_A se la calcula a partir de la Ecuación 53.

$$C_A = m * C_p$$

Ecuación 53

Donde: m = Masa de la probeta, C_p = Calor específico del acero.

La capacitancia C_B se trata de la capacitancia que tiene el volumen del aire caliente en contacto con la carga. Se determina con la Ecuación 54.

$$C_B = m * C_p$$

Ecuación 54

Donde: m = Masa del aire a 910C, C_p = Calor específico del aire a 910C.

Al considerar al ladrillo refractario como la C_C , se la calcula como muestra la Ecuación 55.

$$C_C = m * C_p$$

Ecuación 55

Donde: C_p = Calor específico total efectivo, m = Masa de la pared del horno

Una vez determinadas las capacitancias, se calcula potencia de alimentación del sistema de control mediante la Ecuación 56. Luego este valor se reemplaza en la Ecuación 52 para obtener la ecuación diferencia de transferencia de calor.

$$P = \frac{V^2}{R} = V * I$$

Ecuación 56

Donde: V = Tensión del horno, I = Corriente eléctrica.

Al sustituir las capacitancias y la potencia en la Ecuación 52, se aplica la transformada de Laplace y se simplifica la expresión. Como resultado, se obtiene la ecuación de la función de transferencia de un sistema de primer orden.

El controlador PID debe funcionar con un sistema de control de segundo orden subamortiguado, por lo que se le debe aplicar un máximo sobreimpulso porcentual del 20% [75], para mejorar la estabilidad y el comportamiento del sistema controlado y un tiempo de



asentamiento t_s . Esto se hace para mejorar la respuesta del sistema, alcanzado la estabilidad rápidamente. El cálculo del sobreimpulso porcentual se lo realiza mediante la Ecuación 57:

$$\%M_p = e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)} \quad \text{Ecuación 57}$$

Donde: ξ = Factor de amortiguamiento.

Se determina el factor de amortiguamiento ξ y se lo reemplaza en la Ecuación 58 para calcular la frecuencia natural no amortiguada del sistema.

$$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n} \quad \text{Ecuación 58}$$

Donde: ω_n = Frecuencia natural no amortiguada

Este procedimiento permite calcular el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural del sistema, lo cual es fundamental para el diseño y análisis del sistema de control. Al ser un sistema de segundo orden, se debe considerar el polo dominante como indica la Ecuación 59.

$$s = -\xi\omega_n \pm \omega_n\sqrt{1-\xi^2}j \quad \text{Ecuación 59}$$

Donde: j = Unidad imaginaria.

La función de transferencia de un controlador PID se la muestra en la Ecuación 60:

$$G_{Cs} = \frac{K(s+a)(s+b)}{s} \quad \text{Ecuación 60}$$

Donde: a y b = Constantes del controlador, K = Ganancia del controlador, s = Variable compleja de Laplace.

Para cumplir con la condición de magnitud en el diseño de un controlador PID, se requiere que la ganancia en el punto de diseño sea igual a 1. Esto asegura que el sistema en lazo cerrado tenga una ganancia unitaria en ese punto. Esto se expresa en la Ecuación 61.

$$|G(s)H(s)| = 1 \quad \text{Ecuación 61}$$

3.2.6 Diseño del Circuito Electrónico

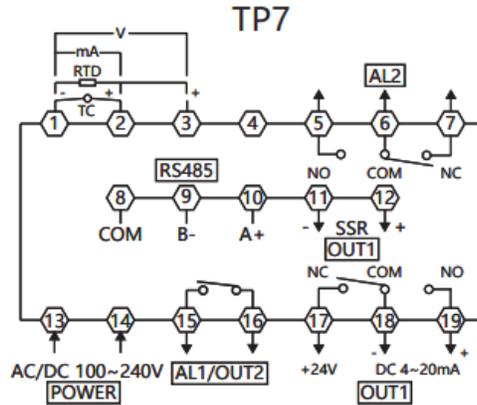
Un circuito electrónico es crucial para garantizar un control preciso de la temperatura, automatizar ciclos térmicos, optimizar el consumo energético y mejorar la seguridad mediante protecciones contra fallos. Además, permite el monitoreo en tiempo real, asegura el proceso y la



calidad del tratamiento. La Figura 18 muestra las conexiones del controlador, que ayuda a monitorear y regular procesos, como el control de temperatura. Los pines en este controlador permiten la conexión de alimentación, entradas de sensores, comunicación y salidas de control.

Figura 18

Hoja de datos del controlador



A continuación, se explica la función de los principales pines que se utilizan para la conexión del circuito. Los pines 1 y 2 son las entradas para el sensor de medición (termocupla) y los pines 11 y 12 son la salida de estado sólido (SST OUT1), emite una señal para activar un relé de estado sólido que puede controlar dispositivos externos.

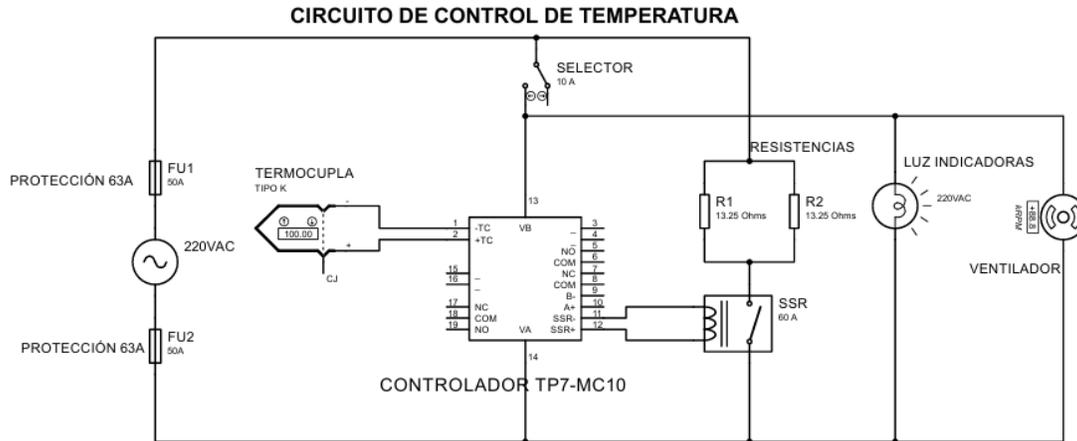
- **Circuito electrónico del sistema**

El diseño del circuito electrónico que se muestra en la Figura 19 incluye todas las conexiones necesarias para garantizar el funcionamiento adecuado del sistema. Este diseño detalla las interconexiones entre los componentes utilizados, para un control de temperatura eficiente.



Figura 19

Circuito electrónico del control de temperatura



3.2.7 Integración del Sistema

La Figura 19 muestra un circuito para un sistema de control de temperatura que incluye un controlador TP7-MC10, una termocupla tipo K, un relé de estado sólido (SSR), resistencias en paralelo, un selector de dos posiciones, una luz piloto, un ventilador. y protecciones mediante fusibles (breaker). El calibre del cable dependió de su función, donde la termocupla, selector, luz piloto y ventilador utilizaron cable AWG 12; mientras que el relé, resistencias y breaker utilizaron cable AWG 8. A continuación, se explica la integración del cableado con los detalles técnicos.

El pin 13 del controlador está conectado al selector, que permite alternar entre diferentes modos de funcionamiento como el ON y OFF. La luz piloto y ventilador están conectados en paralelo a la alimentación de 220 VAC a través del pin 13 y el pin 14 del controlador. La luz piloto sirve como indicador de encendido, y el ventilador se utiliza para enfriar los componentes del sistema. La resistencia R1 y R2 tienen un valor de 13.25 Ω, y al estar conectadas en paralelo, la resistencia equivalente (R_e) se calcula como muestra la Ecuación 42, dando un valor de 6.62 Ω.

Esto implica que, con una alimentación de 220 V, la corriente total a través de las resistencias se la determina con la Ecuación 62.

$$I = \frac{V}{R_e}$$

Ecuación 62



El breaker de 50A fue conectado en serie con la alimentación de 220VAC para proteger el circuito contra sobrecorrientes.

3.2.8 Configuración de Parámetros del Controlador

El controlador trabaja con una termocupla tipo K con las siguientes especificaciones de operación, como muestra la Tabla 20:

Tabla 20

Parámetros de termocupla tipo K

Tipo de entrada	Símbolo	Rango de medición	Resolución	Precisión (23C±0.5)
K1	ϰ	-50 ~ 1200	1C	0.5%

Nota: Adaptado de CONTROLADOR DE TEMPERATURA INTELIGENTE SERIE TP, (2022) [60].

Los indicadores garantizan el funcionamiento eficiente, seguro y preciso del equipo. Estos indicadores proporcionan información en tiempo real sobre las condiciones operativas del equipo, lo que permite supervisar, ajustar y mantener el proceso térmico dentro de los parámetros especificados. El panel de ilustración se muestra en la Figura 20 y Tabla 21, respectivamente.

Figura 20

Panel de ilustración

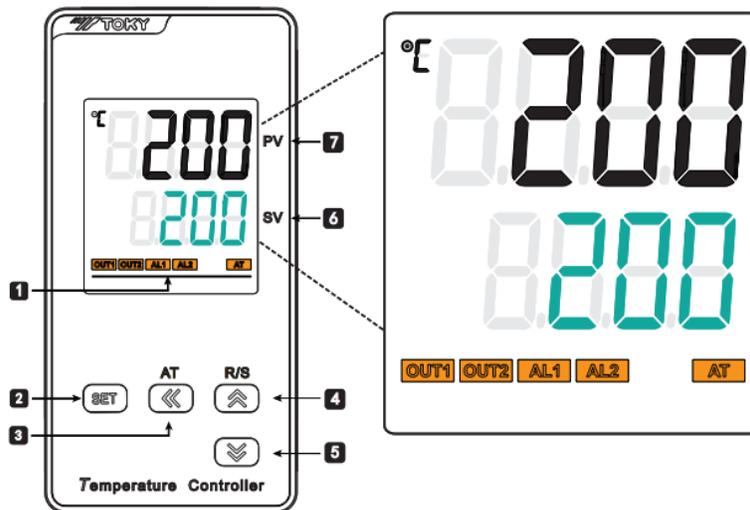




Tabla 21

Especificaciones del panel del control

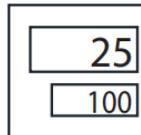
Símbolo	Nombre	Función
AT	AT indicator	Indicador de sintonización automática, se enciende cuando está en estado de sintonización automática.
SET	SET key	Tecla de menú/confirmación, para ingresar o salir del modo de modificación, o para confirmar y guardar el parámetro modificado.
⏪	Shift/AT key	Tecla de activación / tecla Shift / tecla de ajuste automático AT.
⏩	Add key/R/S	Tecla agregar, en modo de medición y control.
⏴	Reduce key	Tecla reducir, comprobar el menú en secuencia.

Nota: Adaptado de CONTROLADOR DE TEMPERATURA INTELIGENTE SERIE TP, (2022) [60].

Para ajustar la temperatura objetivo de control, se mantiene presionado el indicador “AT” durante 3 segundos hasta que la pantalla verde comienza a parpadear. Luego, se utiliza las teclas ⏪ y ⏩ para seleccionar la temperatura deseada de operación como se muestra en Figura 21. La temperatura variará de acuerdo con el tratamiento térmico que se desee realizar.

Figura 21

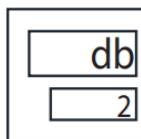
Ilustración de temperatura de trabajo



Para ajustar este control, se mantuvo presionado el indicador “SET” hasta ingresar al menú de configuración. Se seleccionó la opción **db** y se utilizó las teclas ⏪ y ⏩ para configurar el rango de trabajo que tendrá el controlador. Este rango de trabajo será de 5C, véase en Figura 22. Una vez realizada la selección, se confirmó la configuración al pulsar “SET”.

Figura 22

Ilustración de Control PID

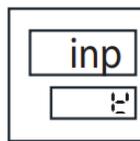




Para alcanzar las temperaturas deseadas, se aseguró de utilizar una termocupla tipo K. Para ello se mantuvo presionado el indicador “SET” hasta ingresar al menú de configuración. Se seleccionó la opción  y se utilizó las teclas ∇ y \wedge para configurar el tipo de termocupla como  como se muestra en la Figura 23. Una vez realizada la selección, se confirmó la configuración con “SET”.

Figura 23

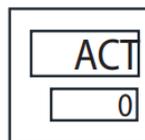
Ilustración de tipo de termocupla



En el mismo menú de configuración, se seleccionó la opción correspondiente  y se utilizó las teclas ∇ y \wedge para activar la función de bloqueo e ingresar a la configuración avanzada. Para acceder a las opciones avanzadas, se introdujo el valor 33 en la pantalla. Una vez realizada la selección, se confirmó la configuración con “SET” para acceder a las opciones avanzadas. Una vez en las opciones avanzadas, se seleccionó la opción  que aparece en la pantalla y se utilizó las teclas ∇ y \wedge para activar el control de salida SSR con el valor de 1 en la pantalla, véase en la Figura 24. Una vez realizada la selección, se confirmó la configuración con “SET” y seguidamente se presionó “SET” por 3 segundos para salir del menú de configuración.

Figura 24

Ilustración salida SSR



3.2.9 *Diseño Experimental*

Los tratamientos térmicos tienen la capacidad de modificar las propiedades originales de los materiales para mejorar sus características. Por ello, el objetivo de diseñar un horno de



tratamientos térmicos superficiales es brindar un conocimiento más detallado sobre el comportamiento de materiales sometidos a tratamientos.

- **Normalizado**

Antes de introducir las probetas de ensayo, es necesario precalentar el horno a una temperatura superior a la de la austenización del acero. Para el caso del Acero ASTM A36, la temperatura de austenización se encuentra en torno a los 840C. Por lo tanto, el horno debe ser precalentado a una temperatura aproximada de 910C, con un margen de 40 a 60C por encima de la temperatura de austenización [76], que se muestra en la Figura 6.

Una vez que el horno alcanzó la temperatura adecuada, se introdujeron las probetas de acero en la cámara térmica. El calentamiento debe ser controlado para asegurar que el material alcance una temperatura uniforme a lo largo de su volumen. El tiempo que las probetas deben permanecer a la temperatura de normalizado depende del espesor de cada pieza. Se recomienda un tiempo de mantenimiento de 1 hora por cada 25 mm de espesor, por tanto, al tratarse de una probeta de 4mm, su tiempo de sometimiento fue de 10 minutos. El proceso de enfriamiento se realizó de manera lenta al aire y se favoreció la formación de granos ferríticos refinados, lo cual mejoró las propiedades mecánicas del acero, como su resistencia y ductilidad [77].

- **Temple**

El horno se precalentó hasta la temperatura de austenización, donde inició a temperatura ambiente y se la elevó lentamente. Para cada acero existe una temperatura de austenización, en el caso del acero ASTM A36 al tratarse de un acero con bajo porcentaje de carbono (0.25% - 0.29%) [78], es considerado un acero hipoeutectoide como se muestra en la Figura 6 en donde su temperatura de austenización será entre 840C [76].

Una vez alcanzada la temperatura de austenización, las probetas fueron ingresadas en la cámara térmica para empezar su proceso de templado. El tiempo de sometimiento de la pieza depende del tamaño de la pieza o de su espesor. En caso de que la pieza tenga un espesor menor a 25 mm, su tiempo de sometimiento vendrá dada por la Ecuación 63.

$$t(D) = 15 + \frac{e}{2}$$

Ecuación 63



En donde: t = Tiempo de sometimiento (hora), e = Espesor (mm).

De acuerdo con la Ecuación 63, el tiempo al que fueron sometidas las probetas para el ensayo de temple fue de 17 minutos. Una vez terminado el tiempo de sometimiento de la probeta, se lo sometió a un enfriamiento rápido en aceite para lograr un aumento de dureza y que la microestructura deseada de la probeta sea la martensita.

- **Revenido**

El horno fue precalentado hasta alcanzar la temperatura requerida para el proceso de revenido, que en este caso correspondió a un tratamiento a baja temperatura, establecida en 300 C según las condiciones del procedimiento aplicado.

La probeta se calentó gradualmente hasta la temperatura de revenido con la que se desarrolló el tratamiento térmico, lo que evita cambios bruscos para reducir el riesgo de deformaciones o tensiones internas. El calentamiento uniforme permitió que la estructura interna del material se ajuste de forma lenta y controlada. Al igual que el normalizado, el tiempo de calentamiento del revenido fue de 10 minutos. El enfriamiento se lo hizo por aire permitiendo una transición térmica controlada para que la probeta alcance un equilibrio de dureza, sin formación de estructuras frágiles [79].

3.2.10 Preparación y Codificación de Probetas para el Ensayo de Dureza Rockwell

La evaluación mecánica del acero requirió una preparación meticulosa de las probetas, que incluyó corte, lijado y verificación dimensional conforme a normativas internacionales, lo que garantizó superficies uniformes y sin imperfecciones antes y después de los tratamientos térmicos, lo que permitió obtener resultados consistentes conforme a los estándares de calidad.

La precisión en los ensayos de dureza Rockwell depende de una preparación meticulosa de las probetas, conforme a la norma ISO 6508. Aunque la normativa no especifica dimensiones exactas, es esencial seleccionar medidas que aseguren superficies uniformes, libres de óxido, residuos y lubricantes. Según la norma ISO, el grosor de la pieza de prueba debe ser al menos 10 veces la profundidad de la indentación permanente para indentadores de diamante y 15 veces para el indentador de bola de carburo de tungsteno. No debe existir ninguna deformación en la parte posterior de la pieza después de la prueba.



El proceso inició con el corte de piezas cuadradas a partir del material base con una moladora equipada con un disco de 2 milímetros de grosor. Para compensar la pérdida de material, se dejó un margen adicional de 2 milímetros. Durante el corte, la aplicación continua de aceite minimizó los efectos térmicos y preservó la estructura del material. Posteriormente, las probetas fueron sometidas a abrasión mecánica con lijas de granulometría progresiva para eliminar irregularidades, marcas o esquirlas, lo que aseguró una superficie uniforme y sin bordes que afectaran los resultados del ensayo. Finalmente, la verificación dimensional con calibradores y micrómetros garantizó el cumplimiento de las especificaciones requeridas.

Antes del ensayo, las probetas fueron limpiadas con alcohol isopropílico y un paño sin pelusa para eliminar cualquier contaminante.

El lijado, realizado antes o después de los tratamientos térmicos, generó superficies lisas y libres de imperfecciones que afecten los resultados. Para eliminar progresivamente irregularidades y defectos, se emplearon lijas de diferentes granulometrías con agua.

El proceso inició con una lija de grano 150 para remover la capa quemada. La lija 180 eliminó marcas y rayaduras, mientras que la lija 240 redujo imperfecciones y mejoró la uniformidad superficial. Posteriormente, la lija 280 eliminó residuos restantes, y la lija 360 homogeneizó la textura. La lija 400 proporcionó una mayor uniformidad, seguida por la lija 1000, que preparó la superficie para el pulido final. Finalmente, la lija 1200 dejó la probeta lista para tratamientos térmicos o ensayos. En el Anexo 7 se detalla este proceso.

La Figura 25 muestra probetas preparadas con un lijado secuencial. Este procedimiento inicial eliminó impurezas y garantizó superficies uniformes. Tras el temple, se repitió el proceso para remover capas dañadas y acondicionar las probetas para análisis posteriores.

Figura 25

Probetas lijadas





La codificación permitió optimizar el procedimiento experimental y facilitar un análisis sistemático durante los ensayos de dureza. Se empleó el siguiente formato:

A36-LC-T(x)-Y

Donde **A36**= Tipo de acero, **LC**= Acero laminado en caliente, **T(x)**= Tipo de tratamiento (T_1 = Material base, T_2 = Temple y T_3 = Templado y Revenido), **Y**= Número de muestra. Se analizaron diez probetas, distribuidas en tres grupos según el tratamiento térmico: cinco sin tratamiento, dos con temple y tres con temple y revenido. La Tabla 22 presenta la codificación asignada a cada probeta.

Tabla 22

Codificación de probetas

Ensayo de dureza Rockwell en acero ASTM A 36		
Grupo	Tratamiento	Codificación
1.	Material base	A36-LC- T ₁ -1
	Material base	A36-LC- T ₁ -2
	Material base	A36-LC- T ₁ -3
	Material base	A36-LC- T ₁ -4
	Material base	A36-LC- T ₁ -5
2.	Temple	A36-LC- T ₂ -6
	Temple	A36-LC- T ₂ -7
3.	Temple y revenido	A36-LC- T ₃ -8
	Temple y revenido	A36-LC- T ₃ -9
	Temple y revenido	A36-LC- T ₃ -10

3.2.11 Ensayo de Dureza según la Norma ISO 6508

El ensayo de dureza Rockwell, según la norma ISO 6508, evaluó la resistencia del material a la penetración de un indentador bajo condiciones específicas. Para medir la dureza superficial del acero ASTM A36, se utilizó la escala Rockwell B. La dureza se define como la capacidad del material para resistir la penetración o el desgaste superficial.

Un durómetro Rockwell, fabricado por Louis Small, aplicó fuerzas controladas y registró la profundidad de la indentación. Para materiales blandos, entre 0 y 100 HRB, se emplea un penetrador esférico de acero de 1/16 de pulgada de diámetro. Para materiales duros, entre 0 y 100 HRC, se utilizó un cono de diamante de 120.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Las mediciones se realizaron en cinco puntos estratégicos de cada probeta para asegurar resultados representativos. El espesor de las probetas fue al menos quince veces que la profundidad de la huella, según lo recomendado por la norma ISO 6508. En este ensayo, se empleó una bola de acero endurecido de 1/16 de pulgada como indentador.

El procedimiento comenzó con la verificación del durómetro. La probeta se colocó sobre un soporte rígido, perpendicular al eje del indentador, para evitar movimientos o vibraciones. Luego, se alineó con el penetrador, y se giró la rueda del equipo en sentido horario hasta que la manecilla grande del dial completó tres vueltas, deteniéndose en posición vertical. Simultáneamente, la manecilla pequeña se alineó con el punto negro, y la marca "SET" coincidió con la manecilla grande.

En el ensayo aplicó inicialmente una fuerza de 98 N durante 3 segundos para estabilizar la muestra, seguida de una fuerza final de 980 N en un intervalo de 3 a 5 segundos. Finalmente, se midió la profundidad de la huella y se registró el valor de dureza directamente en el dial del equipo.

La manija de carga se devolvió lentamente a su posición inicial, lo que redujo gradualmente la fuerza hasta que solo quedó la carga preliminar. Luego, se liberó completamente la probeta y se ajustó el equipo para regresar a su posición original.

La distancia desde el centro de una huella al borde de la probeta debe ser como mínimo dos veces y media su diámetro, y no menor a 1 mm. Entre dos huellas consecutivas, la separación debe alcanzar al menos cuatro veces el diámetro, sin ser inferior a 2 mm.



CAPÍTULO IV

4 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En este capítulo se describe el análisis térmico del horno y la integración del prototipo funcional al laboratorio de metalurgia. Se podrá evidenciar la viabilidad del diseño propuesto acorde a los análisis estáticos a los que fue sometido y su funcionamiento. Una vez completadas la instalación y la configuración del sistema de control del horno, se llevaron a cabo pruebas orientadas a su calibración y validación.

Inicialmente, se realizaron pruebas en vacío para verificar la funcionalidad del sistema y ajustar los parámetros del equipo como el tipo de termocupla y la temperatura de trabajo del controlador. Posteriormente, se desarrollaron pruebas de calentamiento y enfriamiento con tapa cerrada y resistencias encendidas y apagadas, respectivamente; para obtener las curvas características de Temperatura-Tiempo, para evaluar el desempeño térmico del horno.

Entre los tratamientos se encuentran el normalizado, el temple y el revenido, cada una con su curva característica de Temperatura-Tiempo de manera teórica y real, acompañados de un análisis de dureza que permitió confirmar la precisión de las temperaturas alcanzadas y mantenidas según las configuraciones previamente establecidas.

Finalmente, se presentan las propiedades mecánicas obtenidas tras los procesos de normalizado, temple y revenido. Estos resultados se compararon para analizar las mejoras o pérdidas en las propiedades del material, y así validar la eficacia y el correcto funcionamiento del horno en la ejecución de los tratamientos térmicos.

4.1.1 Resultados de los Cálculos de Diseño Térmico

Como parte del proceso de diseño térmico del horno, se realizaron diversos cálculos orientados a garantizar un funcionamiento eficiente y seguro del equipo. Los análisis se centraron en aspectos fundamentales como el aislamiento térmico, la transferencia de calor, el rendimiento energético y el diseño de los elementos calefactores.



- **Revestimiento del horno: espesores y temperaturas**

El análisis del revestimiento térmico permite determinar la temperatura superficial externa y la distribución del calor a través de las capas aislantes. El cálculo iterativo establece una temperatura final de 39.64 C en la superficie metálica externa, valor que cumple la norma ISO 13732-1, la cual fija un límite de 40 C para superficies en contacto con operarios. Este resultado garantiza condiciones seguras y reduce el riesgo de quemaduras.

La transferencia de calor ocurre principalmente por conducción, aunque también intervienen la convección y la radiación en la superficie exterior. Cada capa del revestimiento contribuye a la disminución progresiva de temperatura, lo que asegura un aislamiento eficiente. En la interfaz con la mullita, la temperatura es de 993.56 C; en la alúmina, baja a 899.86 C; en la fibra cerámica, se reduce hasta 39.69 C gracias a sus tres capas compactadas; y en la chapa metálica externa, alcanza los 39.64 C. Esta disposición de materiales mantiene la temperatura externa por debajo del umbral crítico de seguridad.

Los cálculos consideran un coeficiente de transferencia de calor total, determinado por la conductividad térmica de cada material, el espesor de las capas y las pérdidas térmicas al ambiente. La Tabla 23 presenta los valores de temperatura, espesor, conductividad térmica y variación de temperatura (ΔT) en cada capa del revestimiento.

Tabla 23

Temperaturas y espesores en el revestimiento del horno

Materiales	Temperaturas	Temperatura (C)	Espesores	Espesor (m)	Conductividad (W/mK)	N Capas	ΔT (C)
	$T_{Interior}$	1200	---	---	---	---	---
L Mullita	T_1	993.56	e_M	0.060	0.20	1	217.67
L Alumina	T_2	899.86	e_{Al}	0.064	0.47	1	92.63
F Ceramica	T_3	39.69	e_F	0.050	0.12	3	850.27
Acero	T_4	39.64	e_A	0.001	15	1	0.05
	$T_{Ambiente}$	16	---	---	---	---	23.39

Se estableció el diseño con un volumen interno suficiente para realizar pruebas representativas, sin requerir grandes cantidades de material ni elevados consumos energéticos.



Las dimensiones internas y externas del horno se presentan en la Tabla 24, estas medidas fueron definidas a partir del espesor de los materiales utilizados en el revestimiento.

Se priorizó un diseño que facilite el traslado, la manipulación y la instalación en entornos académicos, como laboratorios con espacio limitado. Su tamaño compacto permite un fácil almacenamiento y transporte, lo que lo convierte en una herramienta práctica y versátil.

Tabla 24

Medidas del horno

Medidas externas	Longitudes	Medidas internas	Longitudes
L_e	0.57	l_i	0.28
A_e	0.49	a_i	0.20
AL_e	0.42	al_i	0.23

- **Análisis de transferencia de calor por conducción**

La transferencia de calor por conducción se analizó con base en el área efectiva, la resistencia térmica total y la conductividad térmica equivalente.

El área efectiva se obtuvo con las dimensiones externas del horno de 0.57 m de longitud, 0.49 m de ancho y 0.42 m de altura y las dimensiones internas de la cámara de inducción de 0.28 m de longitud, 0.20 m de ancho y 0.23 m de altura. Con estos valores, el área efectiva resultó en 1.12 m². La resistencia térmica total se calculó a partir de los espesores y las conductividades térmicas de 0.20 W/mK, 0.47 W/mK, 0.22 W/mK y 15 W/mK. Esta resistencia alcanzó un valor de 0.59 K/W. La conductividad térmica, se determinó con el espesor total, la resistencia térmica y el área efectiva. El valor obtenido para la conductividad térmica fue de 0.26 W/mK.

Las pérdidas de calor por conducción se calcularon a partir de la conductividad térmica, el área efectiva, la diferencia de temperatura entre el interior del horno y la cara externa y la suma de los espesores de la pared. La energía térmica disipada alcanzó 1952 W.

- **Análisis de pérdidas de calor por convección**

La transferencia de calor por convección incluyó el cálculo de longitud característica, coeficiente volumétrico, número de Grashof, número de Nusselt y coeficiente de convección.



La temperatura ambiente se estableció en 289.15 K y la temperatura de la superficie externa en 312.79 K. Se determinó la longitud característica a partir del área total y el resultado fue 0.26m. El coeficiente volumétrico se obtuvo como el inverso de la temperatura ambiente y dio un valor de 0.0034 K^{-1} . Con este valor y las propiedades físicas del aire, se calculó el número de Grashof en función de la diferencia de temperatura, el coeficiente de expansión térmica, la longitud característica, la densidad del aire de 1.22 kg/m^3 , la gravedad de 9.8 m/s^2 y la viscosidad cinemática de $1.4792 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$. El resultado obtenido fue 1.262×10^9 . El número de Prandtl tomó un valor de 0.73 con este dato y el número de Grashof, se calculó el número de Nusselt y se obtuvo un resultado de 90.66.

Finalmente, con la conductividad térmica del aire de 0.025 W/mK , se determinó el coeficiente de convección al multiplicar este valor por el número de Nusselt y dividirlo entre la longitud característica. El resultado obtenido fue $8.51 \text{ W/m}^2\text{K}$, esto permitió caracterizar la transferencia de calor desde su superficie hacia el ambiente y dio como resultado 224.62 W .

- **Análisis de pérdidas de calor por radiación**

Para determinar las pérdidas de calor por radiación, se consideró una emisividad del acero inoxidable de 0.66 [80], la constante de Stefan-Boltzmann $5.67 \times 10^{-85} \text{ W/m}^2\text{K}^4$, el área total, la temperatura externa del horno y una temperatura ambiente. Como resultado, la cantidad de calor radiado al ambiente es de 107.85 W .

Las pérdidas de calor a través de las aberturas del horno también fueron evaluadas, se toma en cuenta la constante de Stefan Boltzmann y se determinó que el área de las aberturas su resultado fue de $5.7 \times 10^{-4} \text{ m}^2$, con una diferencia de temperatura de 1184 C elevado a la cuarta potencia. Con estos valores las pérdidas de calor por radiación ascienden a 151.98 W .

- **Análisis de pérdidas de calor hacia la probeta**

El calor transferido a la probeta se calculó en función de su masa de 0.079 kg, calor específico de 0.5 kJ/kgK [69], una diferencia de temperatura de 1184 C y un tiempo de calentamiento de 1020 s, correspondiente al tiempo máximo en el que la probeta permanece sometida a un procedimiento térmico. Como resultado, se obtuvo 0.05 W .



- **Pérdidas totales de calor en el horno**

Las pérdidas de calor en el horno provienen la conducción que representa la mayor disipación con 1952.03 W, seguida por la convección con 224.62 W y la radiación con 107.85 W. Las aberturas generan una pérdida mínima de 0.05 W, mientras que el calor absorbido por la probeta alcanza 151.98 W. La combinación de estos factores determina que las pérdidas totales de calor en el horno asciendan a 2436.53 W.

- **Cálculo energético del horno**

La potencia teórica del horno se obtiene al multiplicar las pérdidas totales de calor por el factor de seguridad de 3, según la norma NFPA 86. Con pérdidas de 2436.53 W, la potencia requerida alcanza 7309.60 W.

La energía total requerida para el funcionamiento continuo del horno se obtiene al sumar las pérdidas totales de calor y la potencia del sistema. Con un valor de 2436.53 W para las pérdidas y 7309.60 W para la potencia, el resultado final es 9746.13 W.

El calor absorbido por el aire en la cámara del horno depende de su masa, calor específico y la diferencia de temperatura entre el interior del horno y el ambiente. El volumen, calculado con las dimensiones internas alcanza un valor de 0.0129 m³. La densidad del aire a 16C, es determinada mediante interpolación entre los valores conocidos a 15C y 20C, es de 1.23 kg/m³. Al multiplicar esta densidad por el volumen, se obtiene una masa del aire de 0.016 kg. Con un calor específico del aire a 16C de 1.01 kJ/kg·K y una diferencia de temperatura de 1184C, el calor absorbido por el aire alcanza 18.88 kJ.

El tiempo necesario para calentar el aire en la cámara del horno depende de una integral que considera la temperatura interna y la ambiente. La masa de aire y su calor específico se establecieron con antelación. La energía total disponible alcanza 9746.13 W. Con estos valores, el tiempo de calentamiento del horno es de 30.37 minutos.

El calor total necesario para calentar el horno se determina a partir del calor absorbido por el aire de 18.88 kJ, las pérdidas térmicas de 2436 W. El tiempo para calentar la pieza se compone por el tiempo de calentamiento del horno y el tiempo máximo de permanencia del proceso térmico, esto da como resultado 2820 s. Con estos valores, se establece la energía necesaria de 2437.40 W.



La eficiencia del horno se determina mediante la relación entre el calor necesario para calentar el horno 2437.40 W, el calor total perdido de 2436.53 W y el calor perdido por aberturas de 151.98 W. Al utilizar estos valores en la ecuación correspondiente, se obtiene el porcentaje de eficiencia del sistema, que es 90.40%.

La masa del horno se obtiene mediante la suma del volumen y la densidad de cada material. El acero inoxidable tiene un espesor de 0.001 m, lo que da un volumen de 0.063 m³ y una densidad de 8000 kg/m³; la fibra cerámica, con un espesor de 0.050 m, presenta un volumen de 0.025 m³ y una densidad de 800 kg/m³; la alúmina, con un espesor de 0.064 m, alcanza un volumen de 0.063m³ y una densidad de 2450 kg/m³; y la mullita, con un espesor de 0.060 m, posee un volumen de 0.016 m³ y una densidad de 800 kg/m³. El producto entre el volumen de cada material y su densidad, junto con la suma de los resultados parciales, permite obtener una masa total de 189.21 kg.

- **Cálculo de elementos calefactores**

La potencia requerida para el funcionamiento del horno considera la diferencia de temperatura entre el interior del horno y el ambiente, así como la resistencia térmica total del sistema de 0.5944 K/W, el cálculo determina una potencia de 1992 W.

La corriente eléctrica necesaria para el funcionamiento del horno depende de la potencia aplicada y el voltaje de alimentación. Con un voltaje de 220 V y una potencia de 7309 W, el sistema requiere una corriente de 33.23 A.

La resistencia equivalente del sistema se obtiene en función de la conexión en paralelo de las resistencias eléctricas. Cada una de las resistencias individuales tiene un valor de 13.25 Ω, lo que da como resultado una resistencia equivalente de 6.62 Ω. Debido a esta configuración, la resistencia total del sistema mantiene el mismo valor de 6.62 Ω.

La resistencia en caliente se calcula a partir de la resistencia equivalente, mientras que la resistencia a temperatura ambiente se determina mediante la aplicación del coeficiente de resistividad de 1.04 para el material Kanthal A-1 [72], la resistencia a temperatura ambiente alcanza un valor de 6.37 Ω y la resistencia en caliente mantiene un valor de 6.62 Ω.

- **Características geométricas de la espira**

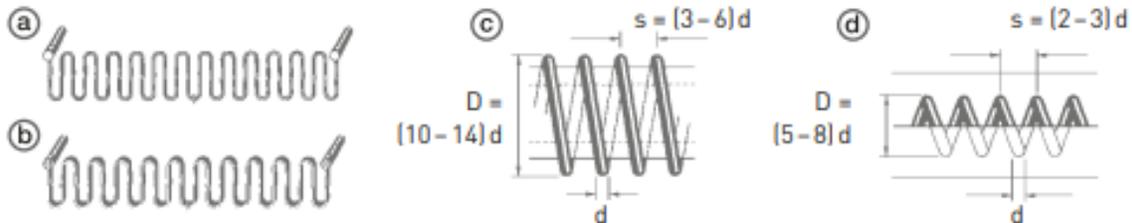


El diámetro del hilo se determina a partir de la potencia térmica, la carga específica, el voltaje aplicado y el coeficiente de resistividad. La potencia térmica es de 1991.80 W, el voltaje aplicado es de 220 V y el coeficiente de resistividad de 1.04.

Para definir la carga específica máxima en función de la temperatura, se selecciona la forma adecuada del alambre calefactor. Entre las configuraciones disponibles se encuentran el alambre ondulado dispuesto verticalmente con soportes de ganchos, la pletina ondulada con el mismo tipo de soporte, alambre arrollado en espiral sobre tubos cerámicos y el alambre en espiral o pletina ondulada sobre ranura, como se muestra en la Figura 26.

Figura 26

Formas del alambre calefactor



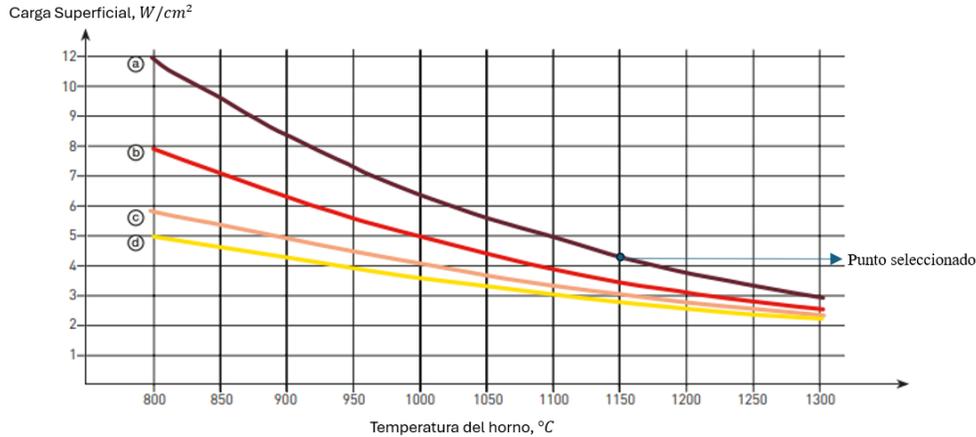
Tomado de: KANTHAL. Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces, (2018) [81].

En este caso, se elige el alambre ondulado dispuesto verticalmente con soportes de ganchos, configuración representada por la letra “a” y la línea café en la Figura 27. En dicha Figura, el eje X representa la temperatura del horno en grados Celsius, se ubica a 1200 C y se traza una línea vertical hasta interceptar la curva café. Desde este punto, una línea horizontal hacia el eje Y indica una carga específica de 3.8 W/cm².



Figura 27

Carga específica Vs Temperatura del horno



Tomado de: KANTHAL. Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces, (2018) [81].

El cálculo del diámetro del hilo da como resultado $22.43 \text{ cm}^2/\Omega$, un valor útil para determinar la sección transversal del alambre. Para seleccionar el diámetro adecuado según la resistencia eléctrica, se consulta el Manual Kanthal [73], donde se presentan valores tabulados de sección transversal por unidad de resistencia.

Al hacer la comparación con la tabla, el valor más cercano al obtenido es $22.7 \text{ cm}^2/\Omega$, correspondiente a un diámetro de 0.11 cm. Por lo tanto, este diámetro es el más adecuado para cumplir con los requerimientos de la resistencia eléctrica.

La longitud total radiante del hilo depende de la potencia térmica requerida de 1992 W, el diámetro del alambre de 0.11 cm y la carga específica de 3.8 W/cm^2 . La longitud total del alambre alcanza un valor de 15.17 m.

El diámetro externo de la espira se determina a partir del diámetro del hilo y el factor de espiralización de 5. El diámetro externo de la espira es de 5.5 mm, equivalente a 0.0055 m.

El número total de espiras se obtiene a partir de la longitud del alambre de 15.17 m, el diámetro externo de la espira de 5.5 mm y el diámetro del hilo 1.1 mm. Con estos valores el número total de espiras alcanza 1097.



La longitud de la espira comprimida se calcula a partir del número de espiras y el diámetro del hilo. Con estos valores la longitud de la espira comprimida es de 1.21 m.

El paso de arrollamiento se obtiene al multiplicar por tres el diámetro del hilo. Por ello la separación entre espiras es de 3.3 mm, equivalente a 0.0033 m. Finalmente, la longitud de la espira extendida depende del paso de arrollamiento y el número total de espiras. Con un paso de 3.3 mm y un total de 1097 espiras, la longitud extendida de la espira alcanza 3.62 m.

4.1.2 Parámetros de Diseño del Horno de Tratamientos Térmicos Superficiales

La Tabla 25 presentó un resumen de los parámetros fundamentales que se consideraron durante el diseño y la construcción del horno. Los parámetros se clasificaron en tres categorías principales: físicas, térmicas y eléctricas.

El diseño físico estableció dimensiones externas de 570 mm de longitud, 490 mm de ancho y 420 mm de altura, mientras que las internas se fijaron en 280 mm de longitud, 230 mm de ancho y 200 mm de altura. La altura desde el piso hasta la base del horno se fijó en 50 mm. El conjunto alcanzó una masa total de 189 kg, y se calculó un área efectiva de 1.12 m². El diseño estableció una temperatura equivalente de 1200 C y fijó una temperatura máxima operativa de 1000 C.

El sistema térmico del horno calculó un requerimiento de calor total de 9746.14 W para alcanzar la temperatura de trabajo. El tiempo de calentamiento se estimó en 30.37 minutos, mientras que el tiempo de enfriamiento alcanzó los 1154 minutos. El modelo térmico cuantificó unas pérdidas totales de 2436.53 W. La eficiencia del sistema se valoró en un 90.40 %, lo que reflejó un adecuado rendimiento energético.

El sistema eléctrico del horno especificó una potencia total de operación de 7309.60 W, mientras que asignó a las resistencias una potencia de 1991 W. El cálculo de la corriente eléctrica determinó un valor de 33.23 A. Las mediciones de resistencia eléctrica registraron 6.62 Ω en operación y 6.37 Ω a temperatura ambiente. El diseño del sistema consideró un diámetro de resistencia de 1.1 mm. La longitud del alambre resistivo utilizado fue de 15.17 m, y el diámetro de cada espira se fijó en 0.0055 m. El modelo eléctrico determinó un total de 1097.28 espiras. La longitud de espira varió entre 1.2 m y 3.6 m dependiendo del estado de compresión o extensión, y se definió un paso de arrollamiento de 0.0033 m.



Tabla 25

Parámetros de diseño

Propiedad	Parámetro	Valores	Unidades
Física	Temperatura equivalente	1200	C
	Temperatura máxima	1000	C
	Dimensiones externas (LxAxAI)	570, 420, 490	mm
	Dimensiones internas (LxAxAI)	280, 200, 230	mm
	Altura del piso al horno	50	mm
	Área efectiva	1.12	m ²
	Masa total del horno	189	kg
Térmicas	Pérdidas totales	2436	W
	Calor total necesario	9746	W
	Tiempo de calentamiento	30.37	min
	Tiempo de enfriamiento	5297	min
	Eficiencia del horno	90.40	%
Eléctricas	Potencia del horno	7309	W
	Potencia de las resistencias	1991	W
	Corriente eléctrica	33.23	A
	Resistencia eléctrica	6.62	Ω
	Resistencia a temperatura ambiente	6.37	Ω
	Diámetro de la resistencia	1.1	mm
	Longitud del alambre	15.17	m
	Diámetro de la espira	0.0055	m
	Numero de espiras	1097	---
Longitud de la espira (comprimida – extendida)	1.2 – 3.6	m	
Paso de arrollamiento	0.0033	m	

4.1.3 *Análisis térmico*

A partir del diseño realizado previamente en la Figura 17 del CAPÍTULO III mediante el uso del software CAD, se simularon las cargas a las que estarán sometidas algunas las paredes del horno. La operación de simulación estática permitió calcular el máximo esfuerzo de Von Mises, el máximo desplazamiento y las deformaciones unitarias, y se verificó así la viabilidad del diseño y su desempeño bajo tratamiento térmico.

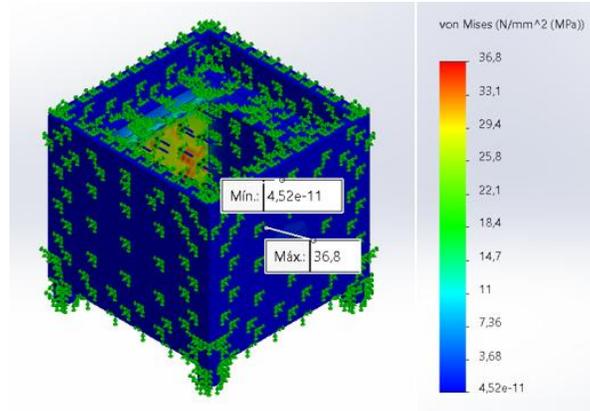
El máximo esfuerzo de Von Mises mide cuanto estrés soporta un material cuando fuerzas multidireccionales actúan sobre él simultáneamente. Este valor indica si el material está a punto de deformarse permanentemente o romperse [82]. Como se observa en la Figura 28, el esfuerzo de Von Mises alcanzó su valor más alto (36.8 MPa) en la cámara interna del horno, ya que esta zona



está directamente expuesta a la carga térmica. Sin embargo, este esfuerzo no superó el límite elástico del material (100 MPa), lo que demuestra que el material opera dentro de un rango seguro, lejos del límite de fluencia o fallo.

Figura 28

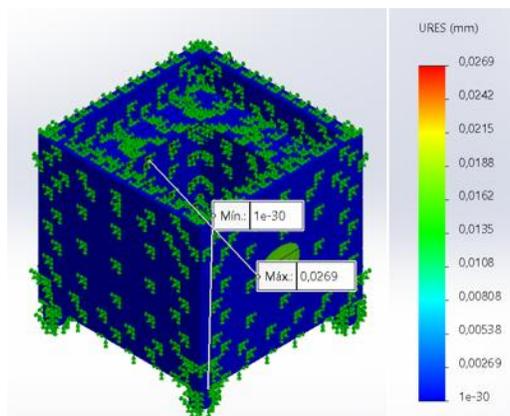
Máximo Esfuerzo de Von Mises



El máximo desplazamiento de un material se refiere al movimiento más grande o la deformación máxima que sufre un objeto bajo la acción de fuerzas o cargas [83]. La Figura 29 muestra que los desplazamientos son bajos, alcanzado un máximo de 0.0269 mm en la pared interior y un mínimo de 1×10^{-30} mm en la pared exterior. Esto indica que el desplazamiento es aceptable y se encuentra dentro del rango de trabajo diseñado para el horno.

Figura 29

Máximo desplazamiento

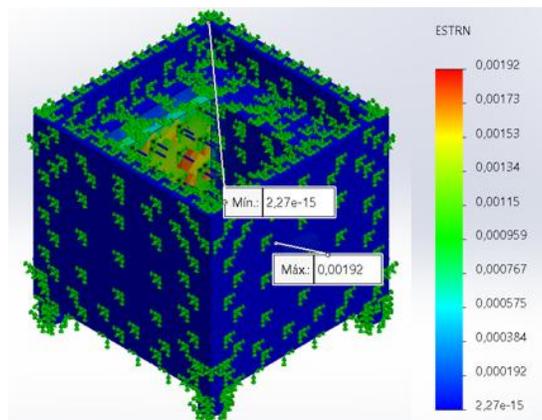




La deformación unitaria es una medida que describe cuánto se deforma un material en comparación con su tamaño original cuando se le aplica una carga [84]. La Figura 30 muestra que la deformación es muy baja, con un máximo de 0.00192 mm en las paredes internas del horno y un máximo de 2.27×10^{-15} mm en las paredes externas. Esto indica que el cambio de dimensiones es mínimo y que el horno opera dentro del rango de trabajo establecido.

Figura 30

Deformaciones unitarias



4.1.4 Modelo Matemático del Controlador PID

El modelo matemático utilizado en el control PID cuenta los valores que regulan el comportamiento del controlador para garantizar su correcto funcionamiento y desempeño. Los valores calculados para el funcionamiento del controlador PID se muestran a continuación:

- **Forma general (Balance de calor)**

Como se explicó en el CAPÍTULO III, para determinar la forma general para la función de transferencia, se tomó como base la ecuación de Balance de Energía en función de los parámetros del horno, teniendo como función inicial:

$$Q_A - (Q_B + Q_C) = C_B \frac{dT_C}{dt} \tag{Ecuación 64}$$

Donde: Q_A = Calor generado por las resistencias, Q_B = Flujo de calor de paredes hacia la probeta, Q_C = Pérdidas de calor a través de las paredes, C_B = Capacidad térmica de los elementos del calentamiento. Sabiendo que:



$$Q_B = \frac{T_D - T_A}{R_{PC}} = C_A \frac{dT_A}{dt}$$

Ecuación 65

$$Q_C = \frac{T_C - T_B}{R_{PE}} = C_C \frac{dT_D}{dt}$$

Ecuación 66

donde: T_A = Temperatura de probeta (910C), T_D = Temperatura de las paredes internas del horno (1200C), R_{PC} = Resistencia térmica entre paredes y probeta, C_A = Capacidad térmica de la probeta, T_B = Temperatura ambiente (16C), T_C = Temperatura de resistencias (1200C), R_{PE} = Resistencia térmica entre paredes y exterior, C_C = capacidad térmica de las paredes del horno; se realizó cálculos para obtener la ecuación de la Forma General que se expresa en la Ecuación 52.

- **Función de transferencia (sistema de primer orden)**

Para la función de transferencia de primer orden, se determinan las capacitancias y la potencia de alimentación del sistema, cuyos valores se presentan en la Tabla 26. De acuerdo con las especificaciones detalladas en el CAPÍTULO III, los resultados se resumen en dicha tabla.

Tabla 26

Capacitancias y potencia del sistema

Variable	Fórmula	Resultado
Capacitancia C_A	$C_A = m * C_p$	$C_A = 0.03935 \frac{kJ}{K}$
Capacitancia C_B	$C_B = m * C_p$	$C_B = 0.004754 \frac{kJ}{K}$
Capacitancia C_C	$C_C = m * C_p$	$C_C = 20.17 \frac{kJ}{K}$
Potencia	$P_{HORNO} = \frac{V^2}{R} = V * I$	$220V * \frac{dq}{dt}$

Sustituyendo las capacitancias y la potencia en la Ecuación 52, se obtiene la ecuación diferencial de transferencia de calor que se expresa a continuación:

$$\tau \frac{d^2 T_A}{dt^2} + 1.001 \frac{dT_A}{dt} = 10.90 \frac{dq}{dt}$$

Ecuación 67

Al utilizar la transformada de Laplace y simplificar su expresión, se obtiene la función de transferencia de primer orden:



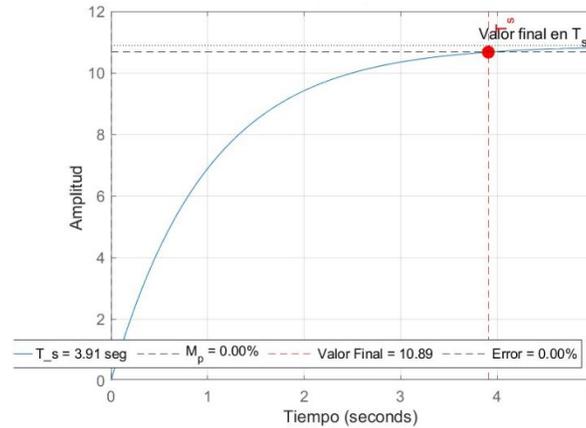
$$\frac{T(s)}{q(s)} = H(S) = \frac{10.90}{Ts + 1.001}$$

Ecuación 68

La Figura 31 muestra los parámetros que genera y que permite obtener una respuesta de escalón unitario en base al diseño de un sistema de control de primer orden amortiguado.

Figura 31

Funcionamiento del sistema sin Control PID



- **Función de transferencia (sistema de segundo orden)**

Para determinar la función de transferencia de segundo orden se calcularon el factor de amortiguamiento y frecuencia natural del sistema, cuyos valores se presentan en la Tabla 27. Estos parámetros se obtuvieron a partir de las Ecuación 57 y Ecuación 58, respectivamente.

Tabla 27

Factor de amortiguamiento y frecuencia natural

Variable	Fórmula	Resultado
Factor de amortiguamiento	$\%M_p = e^{-\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)}$	$\xi \approx 0.456$
Frecuencia natural	$t_s = \frac{4}{\xi\omega_n}$	$\omega_n = 0.045 \frac{rad}{s}$

En un sistema de segundo orden, el polo dominante se determina según la Ecuación 59. Para ello, se sustituyen el factor de amortiguamiento y la frecuencia natural en dicha ecuación, obteniendo como resultado:

$$s = -0.020 \pm 0.040j$$



La Ecuación 60 representa la función de transferencia de un sistema de segundo orden. En ella, se reemplaza el valor calculado del polo dominante, se asume $a = 15$ para lograr un equilibrio entre rapidez de respuesta y estabilidad, y se sustituye la función de transferencia del primer orden, obteniendo:

$$FDT = \frac{10.90K(s + 15)(s + b)}{s(s + 1.001)} \quad \text{Ecuación 69}$$

Para garantizar que el controlador cumpla con la condición de fase, se reemplaza el polo dominante calculado y se analiza la fase según lo especificado en el Anexo 5. A partir de este análisis, se determina el valor de b en la función de transferencia. Esto permite calcular las constantes a y b del controlado PID, que aseguran que el sistema cumpla con las condiciones de estabilidad y rendimiento deseadas.

Según la Ecuación 61, la ganancia unitaria garantiza el cumplimiento de la condición de magnitud en el diseño del controlador PID. Para ellos, la ganancia debe ser igual a 1, para que el sistema sea de lazo cerrado y mantenga una ganancia unitaria en ese punto.

Para obtener esta ganancia, se sustituye los valores de las constantes y del polo dominante en la Ecuación 60, obteniendo como resultado:

$$K = 0.00623$$

Finalmente, se reemplaza el valor de la ganancia unitaria, constantes y polo dominante en la Ecuación 60, y se obtiene la función de transferencia de segundo orden con la que trabajará el controlador PID:

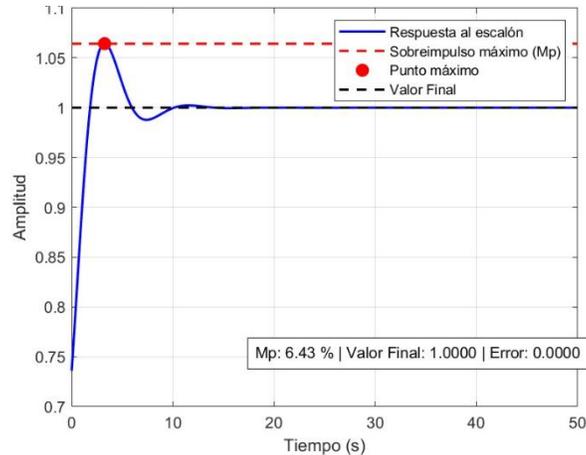
$$G_{cs} = \frac{0.00623(s + 10.90)(s + 0.042)}{s} \quad \text{Ecuación 70}$$

La Figura 32 muestra el comportamiento del sistema bajo un control PID. En ella, se observa un aumento rápido de la amplitud (temperatura) y una estabilización acelerada, alcanzado un valor constante o poco variable en corto lapso.



Figura 32

Funcionamiento del sistema con Control PID



4.1.5 Gráficas de Funcionamiento

Las gráficas de funcionamiento, que incluyen curvas de calentamiento, enfriamiento y desempeño, son esenciales para garantizar la calidad del proceso y cumplir con las especificaciones técnicas. Estas gráficas permiten verificar que las temperaturas y los tiempos sean adecuados para lograr las propiedades deseadas en el material.

- **Curva de calentamiento**

La curva de calentamiento mostró que el horno alcanzó la temperatura ideal de manera controlada. Este control evitará sobrecalentamientos y daños en la superficie del material. El horno aseguró que el proceso cumpliera con las especificaciones requeridas y contribuyó a mejorar la eficiencia. La Tabla 28 presenta los valores de temperatura que el horno utilizó para evaluar su eficiencia de calentamiento.



Tabla 28

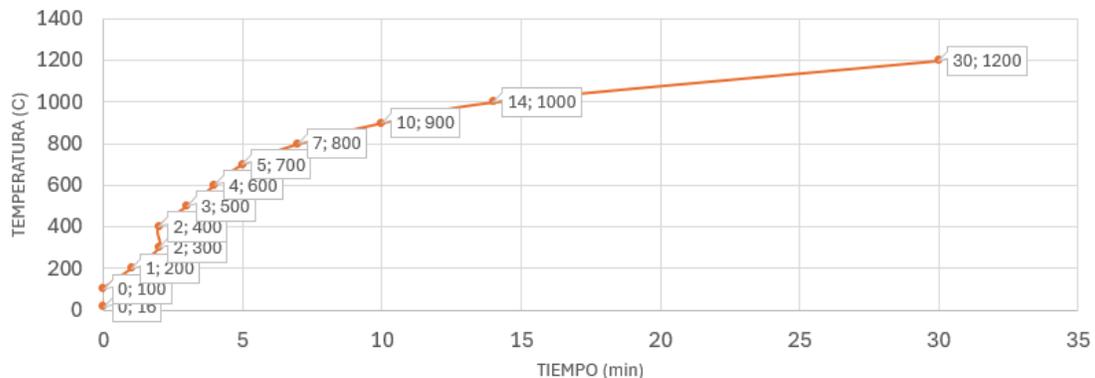
Valores de Temperatura-Tiempo para el calentamiento

Temperatura (C)	Tiempo (min)
16 (temp. ambiente)	0
100	0
200	1
300	2
400	2
500	3
600	4
700	5
800	7
900	10
1000	14
1200	30

La Figura 33 muestra la relación entre la temperatura y el tiempo de calentamiento. El horno comenzó con una temperatura inicial de 16C y aumentó progresivamente hasta alcanzar los 400C en aproximadamente 2 minutos. La temperatura se mantuvo casi lineal hasta llegar a 700C durante los siguiente 3 minutos. A partir del minuto 5, la pendiente de la curva disminuyó porque el horno se acercaba a su capacidad máxima. El horno alcanzó los 1200C después de 30 minutos de funcionamiento. Este comportamiento evidencia que el horno tiene una buena potencia en relación con su tamaño y que no presenta pérdidas excesivas al inicio del proceso. Este tiempo de calentamiento rápido refleja una alta eficiencia eléctrica para un horno de estas características.

Figura 33

Curva de calentamiento





- **Curva de enfriamiento**

La curva de enfriamiento permitió identificar la disipación de calor de manera controlada después de haber alcanzado la temperatura de trabajo. El enfriamiento controlado ayudó a que los materiales refractarios y elementos calefactores no sufran daños. La Tabla 29 presenta los valores de temperatura y tiempo utilizados por el horno para evaluar su eficiencia de enfriamiento.

Tabla 29

Valores de Temperatura-Tiempo para el enfriamiento

Temperatura (C)	Tiempo (min)
1200	0
1000	1
900	2
800	5
700	9
600	15
500	24
400	41
300	81
200	266
100	1154
16 (temp. ambiente)	5297

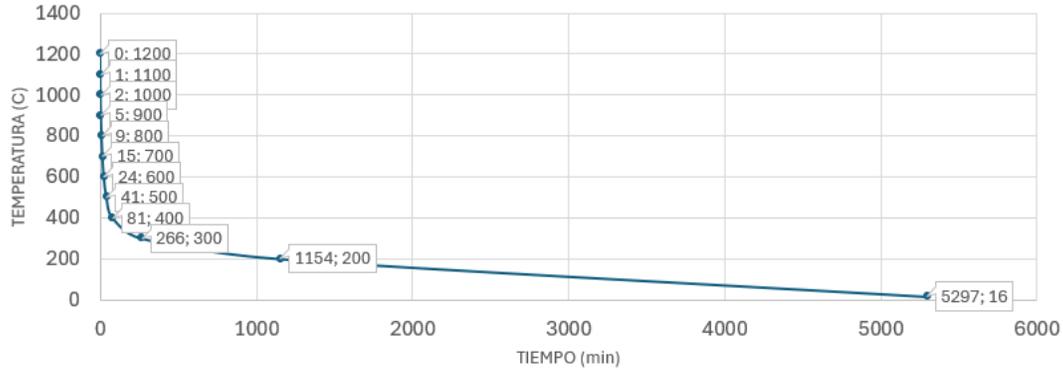
La Figura 34 muestra la distribución de la temperatura del horno desde 1200C hasta 16C en un período de 5297 minutos (88 horas aprox.). La curva presenta una pendiente pronunciada al inicio, ya que la temperatura desciende rápidamente de 1200C a 400C en 81 minutos, lo que indica una alta tasa de transferencia de calor debido a la gran diferencia térmica con el ambiente.

Entre 400C y 300C, el enfriamiento se ralentiza y la pendiente disminuye, alcanzado los 300C en 266 minutos (4.43 horas). Esta reducción en la tasa de enfriamiento ocurre porque la diferencia de temperatura con el entorno es menor. En la última fase, la temperatura desciende de 300C a 16C en aproximadamente 88 horas, con una pendiente casi lineal y negativa. Este enfriamiento sugiere que el horno tiene un buen aislamiento lento y se conserva el calor.



Figura 34

Curva de enfriamiento



- **Curva de desempeño**

La curva de desempeño permitió evaluar la capacidad del horno para alcanzar y mantener las temperaturas requeridas en los tiempos establecidos, tanto en calentamiento como en enfriamiento. Esta curva garantizó un proceso eficiente, uniforme, controlado y de calidad. La Tabla 30 presenta los valores de temperatura y tiempo utilizados para evaluar desempeño.

Tabla 30

Valores de Temperatura-Tiempo para el desempeño

Temperatura calentamiento (C)	Tiempo (min)	Temperatura enfriamiento (C)	Tiempo (min) [enfriamiento continuo]
16 (temp. ambiente)	0	1200	30
100	0	1000	31
200	1	900	32
300	2	800	35
400	2	700	39
500	3	600	45
600	4	500	54
700	5	400	71
800	7	300	111
900	10	200	296
1000	14	100	1184
1200	30	16	5327

Nota: la curva de enfriamiento se ha considerado a partir del tiempo final de calentamiento (30 minutos) para mostrar un enfriamiento continuo desde ese punto, de esta manera, se podrá presentar dos curvas combinadas (calentamiento-enfriamiento) que permitirán una interpretación conjunta del desempeño térmico del horno, mostrando cómo evoluciona la temperatura durante ambos procesos.



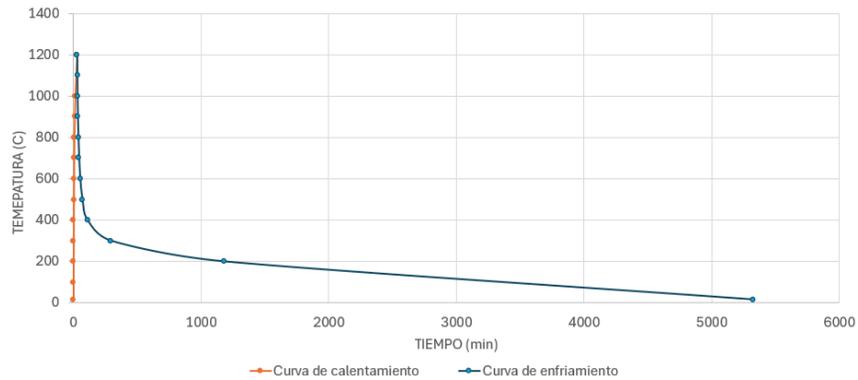
La Figura 35 muestra el comportamiento térmico del horno durante el calentamiento y enfriamiento. El horno alcanza los 1200C en 30 minutos, lo que evidencia un sistema eficiente con una óptima transferencia de energía eléctrica a calor, acorde con la potencia de 7.309kW.

Durante el enfriamiento, la temperatura desciende de 1200C a 400C en 81 minutos, lo que indica pérdidas térmicas iniciales significativas debido a la alta diferencia de temperatura con el ambiente. A partir de este punto, la pendiente de la curva disminuye y el enfriamiento se vuelve gradual y casi lineal, alcanzado los 16C en 5297 minutos (88 horas aprox.). Este comportamiento refleja un buen nivel de aislamiento y retención de calor.

La combinación de una potencia 7.309kW, una resistencia de 6.62 Ω y una corriente de 33.23 A permite un calentamiento rápido y eficiente, ideal para tratamientos térmicos superficiales que requieren alta velocidad en el proceso.

Figura 35

Curva de desempeño



4.1.6 Curvas de Desempeño de Normalizado, Temple y Revenido en Probetas

Las curvas de desempeño en los tratamientos de normalizado, temple y revenido permiten analizar el impacto de la temperatura y el tiempo en las propiedades del material. Estas gráficas garantizan el cumplimiento de las especificaciones técnicas, optimizan las condiciones del tratamiento y aseguran la calidad final del material.

- **Normalizado**

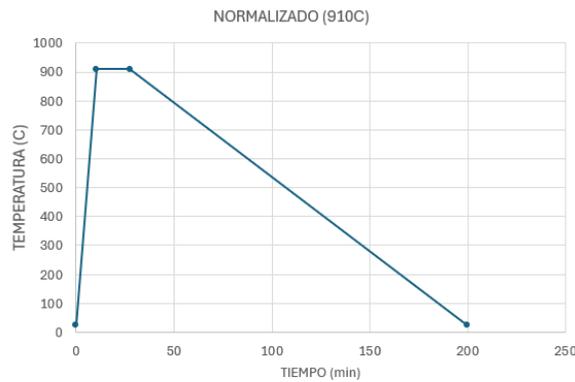
La Figura 36 muestra el comportamiento térmico del proceso de normalizado aplicado a una probeta de acero. El horno, con una temperatura inicial de 16C, fue precalentado hasta 910C



en aproximadamente 10.4 minutos. Al alcanzar la temperatura deseada, se introdujo la probeta y se mantuvo a esa temperatura durante 10 minutos. Luego, se enfrió lentamente en arena, teniendo un normalizado efectivo y una distribución homogénea de la microestructura del acero. La gráfica refleja las tres etapas del proceso: el calentamiento rápido del horno, el mantenimiento de la temperatura durante el tratamiento térmico y el enfriamiento gradual.

Figura 36

Curva de normalizado a 910C



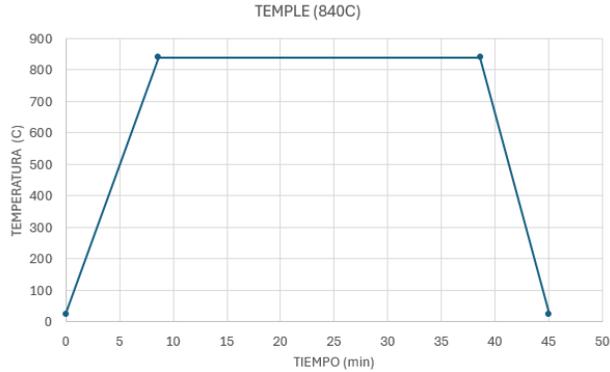
- **Temple**

La Figura 37 muestra el comportamiento térmico del proceso de temple aplicado a una probeta de acero. El horno, con una temperatura inicial de 16C, fue precalentado hasta 840C en 8.6 minutos. Al alcanzar la temperatura deseada, se introdujo la probeta y se mantuvo a esa temperatura durante 17 minutos para garantizar una uniformidad térmica adecuada. Luego, se enfrió bruscamente en aceite, obteniendo un temple efectivo que aumentó la dureza del material y homogeneizó su microestructura. La gráfica refleja las tres etapas del proceso: el calentamiento rápido del horno, el mantenimiento de la temperatura y el enfriamiento brusco.



Figura 37

Curva de temple a 840C

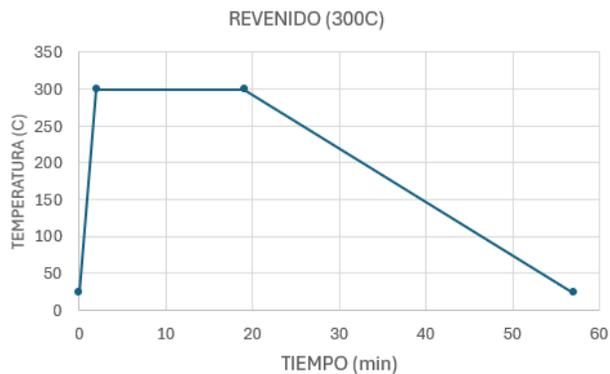


- **Revenido**

La Figura 38 muestra el comportamiento térmico del proceso de revenido aplicado a una probeta de acero. Al alcanzar la temperatura deseada, se introdujo la probeta y se mantuvo a 300C durante 10 minutos para garantizar una uniformidad térmica adecuada. Luego, se enfrió lentamente al aire, obteniendo un revenido efectivo y así liberar las tensiones acumuladas durante el temple. Al igual que en los procesos de normalizado y temple, la gráfica refleja las tres etapas del proceso: el calentamiento rápido del horno, el mantenimiento de la temperatura y el enfriamiento lento.

Figura 38

Curva de revenido a 300C



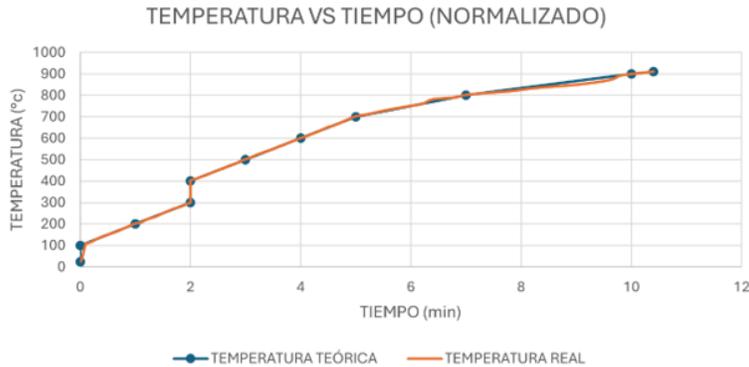
La Figura 39 presenta la curva Temperatura-Tiempo correspondiente al proceso de normalizado, mostrando una notable coincidencia entre los valores teóricos y reales de temperatura



durante todo el ciclo térmico. Esta precisión se debe a la acción eficaz del controlador PID, que regula de forma constante el aumento de temperatura hasta alcanzar el rango requerido para el tratamiento. La fidelidad entre ambas curvas evidencia un control térmico confiable y asegura la homogeneidad estructural del material tratado.

Figura 39

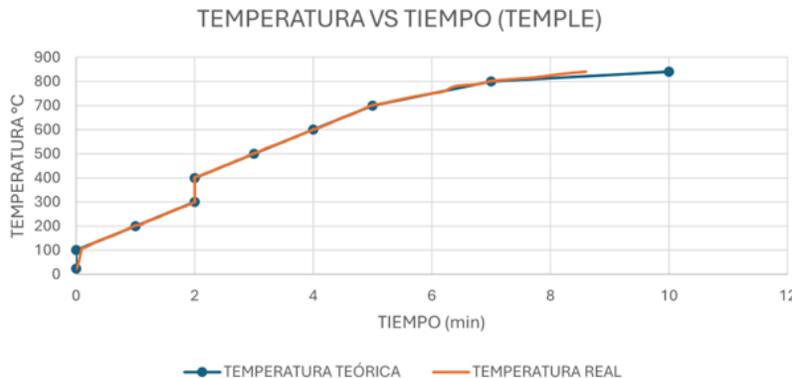
Comportamiento teórico-real del normalizado



En el caso del temple, la Figura 40 ilustra cómo la curva de calentamiento sigue de cerca los valores teóricos establecidos, con una desviación mínima gracias a la regulación proporcionada por el controlador PID. Este control preciso es crucial en el temple, ya que permite alcanzar rápidamente la temperatura crítica antes del enfriamiento brusco, garantizando así la transformación estructural deseada en el material.

Figura 40

Comportamiento teórico-real del temple

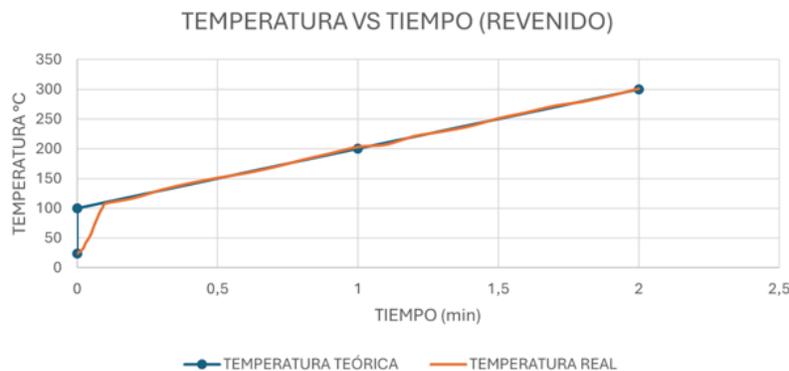




Para el revenido, la Figura 41 muestra una curva de calentamiento que mantiene una excelente medición entre los valores reales y los teóricos establecidos en las tablas del Anexo 6. El controlador PID asegura una transición suave y estable de temperatura, característica esencial de este proceso destinado a reducir tensiones internas y aumentar la tenacidad del material. La estabilidad térmica alcanzada en esta etapa reafirma la confiabilidad del sistema de control implementado.

Figura 41

Comportamiento teórico-real del revenido



4.1.7 Comportamiento de la Temperatura frente al Control PID

Mediante una tolerancia en el control PID, el controlador delimitó dos valores que definieron el encendido y apagado de las resistencias del horno. Estos valores fueron determinados de acuerdo con los requerimientos para garantizar un desempeño óptimo del horno.

En el CAPÍTULO III se estableció una tolerancia de 5C, por lo que las resistencias del horno se desactivarán de acuerdo con la Ecuación 71:

$$T_{trabajo} \geq T_{trabajo} + 5C$$

Ecuación 71

Y volverán a encenderse como muestra la Ecuación 72:

$$T_{trabajo} \leq T_{trabajo} - 5C$$

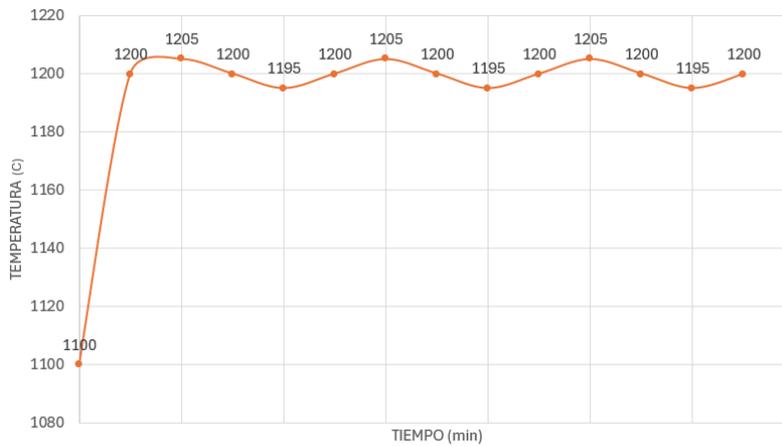
Ecuación 72



La Figura 42 muestra el comportamiento de la temperatura con una tolerancia de 5C implementada en el control PID.

Figura 42

Comportamiento de la temperatura frente al control PID



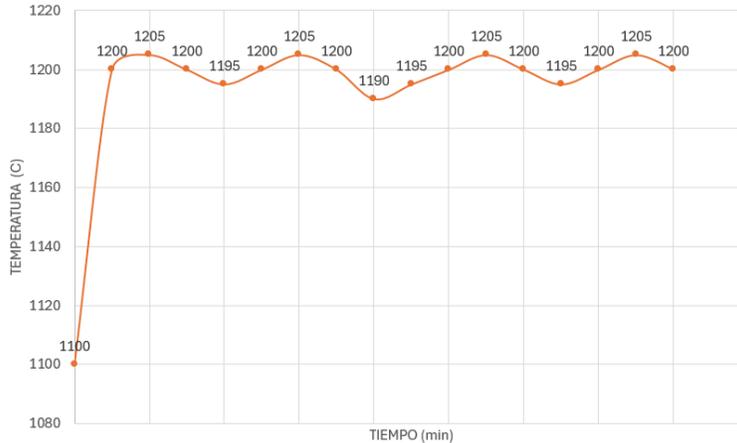
4.1.8 Comportamiento de la Temperatura con Pérdidas de Calor Forzadas

Las pérdidas de calor forzadas ocurrieron al retirar la tapa del horno, donde se provocó una caída de temperatura de aproximadamente 10C. Esta variación dependió del tiempo de exposición de la cámara térmica a la temperatura ambiente de 16C. La Figura 43 muestra la curva de calentamiento, donde se evidencian las pérdidas de calor forzadas y el rápido restablecimiento de la temperatura de trabajo, logrado gracias a la tolerancia implementada en el controlado PID



Figura 43

Comportamiento de la temperatura con pérdidas de calor forzadas



4.1.9 Verificación de Temperaturas de Trabajo Alcanzadas

Para verificar las temperaturas durante los procesos, se utilizó una cámara térmica que midió la temperatura superficial y ambiental del horno y las probetas tras los tratamientos térmicos. Al realizar las mediciones, se determinó su capacidad, con un rango de -20C a 430C y una precisión de $\pm 5C$.

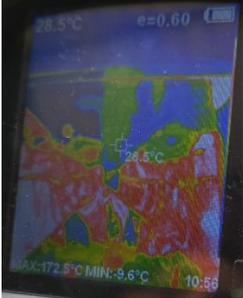
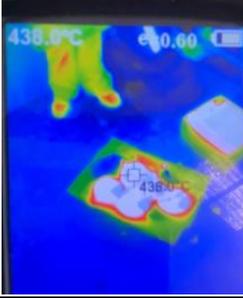
- **Temple**

Durante el tratamiento térmico de temple, las probetas fueron calentadas a 840C durante 17 minutos. Debido a que esta temperatura supera el límite de medición de la cámara térmica, no fue posible obtener una medición exacta. Sin embargo, el equipo registró la máxima temperatura permitida por su rango operativo (430C), lo que sugiere que el horno alcanzó la temperatura requerida para el tratamiento. Las temperaturas alcanzadas se pueden evidenciar en la Tabla 31.



Tabla 31

Temperaturas en el proceso de temple

Punto de verificación	Descripción	Figura
Paredes externas del horno	Como se observa en la figura, la temperatura de la pared externa del horno fue de 28.5C. Este valor se encuentra dentro del rango aceptable de operación, de acuerdo con el cálculo realizado en el CAPÍTULO III que arrojó un valor de 39.64C.	
Cámara interna del horno	De acuerdo con la figura, la temperatura máxima registrada en la cámara interna del horno fue de 436.7C. Este valor supera el límite teórico del equipo (430C), teniendo en consideración la tolerancia de $\pm 5C$, lo que indica que el horno alcanzó la temperatura máxima medida por la cámara térmica y lo requerido para el temple.	
Probetas	De manera similar, la figura muestra que la temperatura máxima registrada en las probetas fue de 438C. Esto se debe a la restricción del rango operativo de la cámara térmica (430C). A pesar de esta limitación, se concluye que la temperatura alcanzada fue la requerida para el tratamiento de temple.	

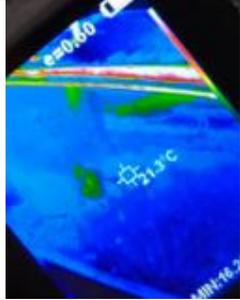
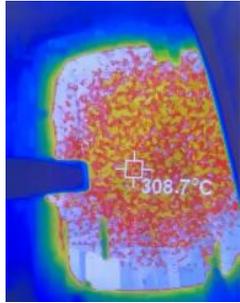
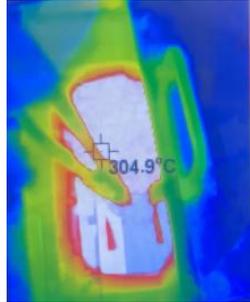
- **Revenido**

Para el tratamiento térmico de revenido, las probetas fueron calentadas a 300C durante 10 minutos. En este caso, la temperatura se encuentra dentro del rango operativo de la cámara térmica, lo que permitió obtener mediciones más exactas. Las temperaturas se muestran en la Tabla 32.



Tabla 32

Temperaturas en el proceso de revenido

Punto de verificación	Descripción	Figura
Paredes externas del horno	Como se observa en la figura, la temperatura de la pared externa del horno fue de 21.3C. Este valor es inferior al registrado durante el temple (28.5C), debido a que la temperatura del revenido es considerablemente menor..	
Cámara interna del horno	La figura muestra que la temperatura máxima registrada en la cámara interna del horno fue de 308.7C, lo que está dentro del rango de medición del equipo. Esto confirma que el horno alcanzó la temperatura requerida para el tratamiento de revenido.	
Probetas	De acuerdo con la figura, la temperatura registrada en las probetas fue de 304.9C, un valor cercano al medido en la cámara interna del horno. Esto valida que el horno alcanzó la temperatura necesaria para el tratamiento de revenido.	

4.1.10 Impacto de los Tratamientos Térmicos en las Probetas

Las imágenes de las probetas de acero ASTM A36 muestran su estado en tres condiciones: sin tratamiento térmico, tras el temple y después del temple con revenido. Estas evidencian los cambios físicos y superficiales causados por la temperatura y el enfriamiento.

En su estado inicial, las probetas no presentan alteraciones visibles, oxidación ni desprendimientos, como se muestra en la Figura 44. La superficie es homogénea, con bordes definidos y lisos, esto representa las condiciones originales del material.



Figura 44

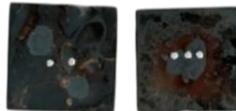
Probetas sin tratamiento térmico



En la siguiente etapa, el temple genera cambios significativos. El enfriamiento rápido provoca la formación de óxido superficial debido al contacto con el oxígeno, lo que da lugar a una superficie quemada y descascarillada. La Figura 45 muestra una textura rugosa y opaca, lo que evidencia la pérdida de material superficial y la alteración en la uniformidad.

Figura 45

Probetas templadas



Finalmente, el revenido modifica las características adquiridas en el temple. La textura superficial mejora y adquiere mayor homogeneidad. La Figura 46 muestra una coloración azulada que indica la formación de una capa de óxido protector. No se observó pérdida de material, lo que confirmó la reducción de tensiones internas y la estabilidad estructural.

Figura 46

Probetas templadas y revenidas



4.1.11 Análisis e Interpretación de los Ensayos de Dureza

Los ensayos de dureza en probetas de acero A36 fueron ejecutados conforme a la norma ISO 6508, para determinar la dureza Rockwell superficial. Las pruebas se llevaron a cabo en la Universidad de las Fuerzas Armadas, en el Laboratorio de Ciencia de los Materiales. Se evaluaron tres condiciones del material: base, temple y temple con revenido. Para obtener un promedio representativo de las propiedades mecánicas, se realizaron cinco mediciones en diferentes puntos de cada probeta. Estos ensayos permitieron verificar el cumplimiento de las temperaturas



requeridas durante los tratamientos térmicos. Los valores promedio de dureza se presentan en la Tabla 33, mientras que los datos individuales de cada medición se consignan en el Anexo 3.

Tabla 33

Ensayo de dureza HRB

Ensayo de dureza Rockwell HRB en acero ASTM A 36			
Grupos	Tratamiento	Codificación	Dureza
1	Material base	A36-LC- T ₁ -1	76.20
	Material base	A36-LC- T ₁ -2	75.60
	Material base	A36-LC- T ₁ -3	78.40
	Material base	A36-LC- T ₁ -4	79.20
	Material base	A36-LC- T ₁ -5	77.20
Promedio			77.32
2	Temple	A36-LC- T ₂ -6	82.20
	Temple	A36-LC- T ₂ -7	80.60
Promedio			81.40
3	Temple y Revenido	A36-LC- T ₃ -8	58.60
	Temple y Revenido	A36-LC- T ₃ -9	59.40
	Temple y Revenido	A36-LC- T ₃ -10	65.00
Promedio			65.66

Los resultados obtenidos confirman que los tratamientos térmicos modifican las propiedades mecánicas del acero A36, lo que permite ajustar la dureza según la aplicación. El material en su estado base presentó una dureza promedio de 77.32 HRB, lo que refleja su estructura original sin alteraciones. Con el temple, la dureza se incrementó a 81.40 HRB por la formación de martensita durante el enfriamiento rápido, lo que mejoró la resistencia al desgaste y la rigidez. Posteriormente, en las probetas sometidas a revenido, la dureza disminuyó a 65.66 HRB, lo que evidencia una reducción de tensiones internas y un aumento en la ductilidad y tenacidad, lo que optimiza el equilibrio entre resistencia y capacidad de deformación.

El ensayo de dureza en las probetas templadas registró un incremento del 5.28 %, con un aumento de 77.32 HRB en el material base a 81.40 HRB tras el temple. Este resultado confirma que el tratamiento térmico se realizó correctamente y que se alcanzaron las temperaturas críticas para la transformación estructural. La formación de martensita aumentó la dureza y la resistencia mecánica, aunque redujo la tenacidad. Sin embargo, la composición química del acero A36 permite mantener un equilibrio entre ductilidad y resistencia, lo que evita una fragilidad excesiva.



La uniformidad en los valores de dureza sugiere una distribución homogénea del calor y evidencia el desempeño adecuado del horno utilizado.

El ensayo de dureza en las probetas revenidas mostró una disminución del 19.34 %, con una reducción de 81.40 HRB en el estado templado a 65.66 HRB tras el revenido. Este cambio se debe a la disipación de tensiones internas y a la transformación parcial de la martensita en estructuras más estables, como la bainita. El revenido mejoró la tenacidad y redujo la fragilidad del acero templado. La disminución en dureza aumenta la resistencia al impacto y disminuye la susceptibilidad a la fractura. Además, la coloración azulada observada en las probetas indica la formación de una capa de óxido superficial que protege contra la oxidación y la corrosión, lo que prolonga la vida útil del material.

4.1.12 Evaluación Económica para la Construcción del Horno

La construcción del horno de tratamientos térmicos permitió realizar ensayos de temple y revenido en probetas de acero A36. Esta sección presenta los costos asociados con su diseño, fabricación y operación. Para optimizar recursos, se emplearon los materiales e instalaciones disponibles en la Universidad Técnica del Norte. La inversión total ascendió a 890.95 USD, lo que representó un ahorro significativo en comparación con un horno comercial.

El diseño térmico del horno requirió materiales con alta resistencia al calor y su durabilidad al desgaste, con una inversión total de 320.44 USD. La estructura externa se construyó con chapa de acero inoxidable AISI 304, elegida por su resistencia a la corrosión y facilidad de fabricación, con un costo de 20.00 USD. En el diseño eléctrico, se integraron componentes esenciales para el control de la temperatura y la seguridad operativa, con una inversión de 367.01 USD. Para verificar la eficiencia del horno en los tratamientos térmicos, se realizaron ensayos de dureza en probetas de acero A36, con un costo total de 183.50 USD. La Tabla 34 presenta el desglose detallado de los costos de materiales y ensayos.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



Tabla 34

Costos de los materiales de construcción

Costos de los materiales y prueba del horno					
Diseño térmico					
Denominación	Especificaciones	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
Ladrillo liviano	Mullita	Unidad	5	6.72	33.58
Ladrillo refractario	Alto en alúmina	Unidad	33	4.50	148.50
Mortero refractario	Mortero vesuvius	Kilogramo	1	67.98	67.98
Manta refractaria	F/Ceram 762x61	Caja	1	70.38	70.38
Total					320.44
Diseño mecánico					
Denominación	Especificaciones	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
Chapa metálica	AISI 304	Plancha	1	20.00	20.00
Total					20.00
Diseño eléctrico					
Denominación	Especificaciones	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
Resistencia Kanthal	Resistencia bobin	Unidad	2	40.00	80.00
Sensor temperatura	Termocupla K	Unidad	1	90.00	90.00
Controlador de tem	TP7-MC10	Unidad	1	61.50	61.50
Relé solido	MAXWELL	Unidad	1	45.00	45.00
Disyuntor tipo riel	Breaker P/ Riel	Unidad	2	9.30	18.60
Interruptor selector	EBSA4-BD21	Unidad	1	4.00	4.00
Indicador luminoso	Luz piloto Verde	Unidad	1	1.80	1.80
Ventilador	Ventilador 220V	Unidad	1	5.00	5.00
Borneras cerámicas	Bornera 4entradas	Unidad	6	2.50	15.00
Alambre alta tem	Alambre num 12	Metro	1	4.00	4.00
Alambre Nro. 8	Alambre AWG	Metro	19	1.65	31.35
Enchufe	Enchufe Power	Unidad	1	3.81	3.81
Toma corriente	P/Gallina	Unidad	1	6.95	6.95
Total					367.01
Costo de ensayo					
Denominación	Especificaciones	Unidad	Cantidad	Costo unitario	Costo parcial
Acero A36	Acero ASTM A36	Plancha	1	30.00	30.00
Arena fina	Arena rocafuerte	Kilogramo	10	1.50	1.50
Aceite residual	LEADER SUPER	Litros	10	2.00	2.00
Ensayo de dureza	Rockwell B	Unidad	15	2.00	150
Total					183.50
Costos totales					
Total					890.95



CAPÍTULO V

Conclusiones y recomendaciones

Conclusiones

- Si bien el diseño actual permite alcanzar 1200 C en un tiempo estimado de 30 minutos con una potencia de 7309 W, este parámetro no es absoluto, sino adaptable según los requerimientos específicos del proceso. La modelación demostró que una disminución en la resistencia térmica permitiría incrementar la potencia útil y la corriente necesaria y, con ello, reducir el tiempo de calentamiento. Esta flexibilidad operativa no solo valida la precisión del modelo propuesto, sino que abre posibilidades para la optimización del horno en futuras aplicaciones, según las necesidades térmicas y energéticas de cada tratamiento.
- La validación estructural y térmica del horno mediante diseño CAD y modelado matemático permitió corroborar que el equipo cumple con las condiciones de seguridad y eficiencia requeridas para su funcionamiento. Las simulaciones realizadas bajo condiciones de operación a 1200 C evidenciaron un esfuerzo máximo de 36.8 MPa, 63.2% inferior al límite elástico del sistema (100 MPa), lo que garantiza que la estructura no presenta deformaciones ni fracturas durante su operación. Estos resultados, sumados a la potencia de trabajo calculada de 7309 W y un tiempo de calentamiento de 30 minutos, validan la viabilidad del diseño propuesto, asegurando la correcta ejecución de tratamientos térmicos superficiales.
- La implementación del controlador PID resultó eficaz para regular con precisión la temperatura durante los tratamientos térmicos, asegurando una respuesta estable y eficiente. El sistema presentó un sobreimpulso del 20 % y un tiempo de asentamiento de 3.91 segundos, valores adecuados para evitar oscilaciones significativas y lograr una rápida estabilización. Aunque la función de transferencia varía ligeramente con la temperatura, el



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



sistema permanece subamortiguado en lazo cerrado, manteniendo una respuesta térmica controlada y predecible.

- El análisis del sistema eléctrico del horno permitió concluir que la correcta selección del calibre del cableado, basada en la demanda de corriente de cada componente, es esencial no solo para la seguridad operativa, sino también para la estabilidad térmica del sistema. La implementación de cables AWG 10 para elementos de baja carga y AWG 8 para componentes de alta demanda eléctrica garantizó una conducción eficiente, evitando sobrecalentamientos y pérdidas térmicas. En este sentido, la correcta selección del calibre del conductor es una variable crítica que incide directamente en el comportamiento termodinámico del equipo.
- La funcionalidad del horno para realizar tratamientos térmicos se validó mediante la aplicación de normalizado, temple y revenido en probetas de acero ASTM A36. El equipo alcanzó y sostuvo las temperaturas requeridas de 910 C, 840 C y 300 C, con una tolerancia de ± 5 C, incluso cuando se provocaron pérdidas térmicas. Se confirmó una distribución homogénea del calor mediante el uso de una cámara infrarroja. El horno mostró eficiencia térmica al alcanzar 1200 C en 30 minutos y al registrar un tiempo de enfriamiento natural de 88 horas. Las probetas presentaron rugosidad, óxidos y descascarillado tras el temple, mientras que después del revenido se observó una superficie más uniforme con una capa protectora. Estos resultados evidenciaron la capacidad del horno para generar condiciones térmicas controladas y repetibles.
- El correcto funcionamiento del horno para aplicaciones térmicas superficiales se comprobó cuantitativamente mediante el análisis de dureza posterior a los tratamientos. Los valores registrados variaron de forma consistente según el tratamiento aplicado, lo que confirmó que el equipo generó y mantuvo las condiciones térmicas. El material base presentó una dureza promedio de 77.32 HRB, que se incrementó a 81.40 HRB tras el temple, con un



aumento del 5.28 %. Luego del revenido, la dureza se redujo a 65.66 HRB, correspondiente a una disminución del 19.34 %. Esta disminución reflejó una mejora en la tenacidad del material y una menor fragilidad. La estabilidad térmica lograda y la repetibilidad de los resultados respaldaron el desempeño del horno con fines experimentales y de formación técnica.

Recomendaciones

- Se recomienda explorar la optimización del diseño térmico del horno mediante ajustes en los materiales aislantes, con el fin de reducir la resistencia térmica total equivalente. Esto permitiría adaptar el sistema a requerimientos de calentamiento más exigentes, como tiempos de calentamiento más cortos, manteniendo un consumo energético eficiente. Asimismo, se sugiere utilizar el modelo matemático desarrollado como herramienta predictiva en futuras mejoras del diseño, lo que facilitará decisiones fundamentadas en función del rendimiento térmico esperado.
- Considerando la validación estructural y funcionamiento del horno, se recomienda que durante los procesos de mantenimiento o reposición de componentes (como la cámara térmica, paredes del horno o sistema de control), se utilicen exclusivamente los mismos materiales empleados originalmente. Esto garantizará la eficiencia térmica, la integridad estructural y prologará la vida útil del equipo.
- Debido a que el sistema de control PID es fundamental para la estabilidad térmica del horno, se sugiere realizar inspecciones visuales periódicas del circuito de control antes de cada uso. Esta práctica permitirá identificar conexiones sueltas, desgaste en componentes electrónicos o posibles señales de deterioro, lo cual es esencial para evitar sobrecargas o interrupciones en el proceso térmico, manteniendo así la calidad de los tratamientos realizados.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



- Considerar la influencia del calibre del cableado y la distribución de corriente permitirá prever con mayor precisión las pérdidas térmicas y su impacto en el tiempo de calentamiento y estabilidad de temperatura. De esta forma, se fortalecerá el diseño integral del sistema, garantizando que tanto los aspectos térmicos como eléctricos trabajen en conjunto para maximizar el rendimiento y la seguridad del equipo.
- Se recomienda el uso del horno en aplicaciones que requirieran un control térmico preciso, particularmente en contextos experimentales e industriales donde resultara crítica la estabilidad térmica. La implementación de ciclos térmicos consecutivos optimizaría el rendimiento del equipo, ya que reduciría la frecuencia de encendidos, lo que mejora la eficiencia energética y prolonga la vida útil de los elementos calefactores. La integración de un sistema de monitoreo térmico en tiempo real permitiría registrar variaciones de temperatura y ajustar los parámetros operativos según el comportamiento térmico registrado. También se sugiere ampliar las evaluaciones mediante diferentes configuraciones de carga y tipos de metales, además de explorar nuevos tratamientos superficiales, para fortalecer el desarrollo del horno como una herramienta adaptable a distintos procesos térmicos orientados a la investigación y a la formación técnica.
- Contar con un registro detallado de las condiciones operativas y de los resultados obtenidos con diferentes materiales facilitaría establecer un marco técnico para futuras investigaciones. La combinación de ensayos de dureza con pruebas de tracción y estudios metalográficos permitiría verificar de forma más completa los cambios en las propiedades mecánicas del material. La estabilidad térmica y la repetibilidad observadas podrían aprovecharse para incorporar funciones avanzadas, tales como rampas programadas de calentamiento y ciclos automáticos, lo cual amplía el potencial del horno en entornos de laboratorio y en proyectos de investigación aplicada.



Referencias bibliográficas

- [1] J. Luis y J. Luis Massón Guerra MESI, «Measures of Science Technology in Ecuador Measures of Science & Technology in Ecuador», Quito, mayo 2008.
- [2] B. P. Atacusí Hidalgo, «Estudio del tratamiento térmico de normalizado en el hierro fundido gris y su incidencia en la dureza y la resistencia», Trabajo de grado, Universidad Técnica de Ambato, Ambato, 2013.
- [3] M. M. Mafla Martínez y V. F. Aguirre Valencia, «Diseño de un horno para tratamientos térmicos de aceros para la empresa SMO servicios mecánicos y metalúrgica norte», Trabajo de grado, Universidad Técnica del Norte, Ibarra, 2020.
- [4] D. R. Masapanta Lasso y A. H. Silva Zamora, «Implementación de un horno eléctrico programable para el tratamiento térmico de metales en la Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná», Trabajo de investigación, Universidad Técnica de Cotopaxi Extensión La Maná, La Maná, 2022.
- [5] A. E. Torres Vásquez, «Diseño, programación e instalación en un sistema de control de supervisión y adquisición de datos de un horno Lindberg para el laboratorio de tratamientos térmicos», Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [6] Vicepresidencia República del Ecuador, «Estrategia nacional para el cambio de la matriz productiva», Quito, 2007.
- [7] L. R. Calderón Centeno y G. F. Morillo Ortega, «Análisis de la influencia de los tratamientos térmicos (recocido y revenido), en las propiedades mecánicas de la aleación de aluminio 7075-T651 mediante ensayos de tracción», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2019.
- [8] F. S. Lara Chichande y A. N. Quinga Oña, «Comparación de los tratamientos térmicos en los aceros más utilizados en el Ecuador», Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2022.
- [9] Escuela Politécnica Nacional, «Laboratorio de Tratamientos Térmicos y Superficiales», Escuela Politécnica Nacional. Accedido: 15 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.epn.edu.ec/laboratorio-de-tratamientos-termicos-y-superficiales/>
- [10] Francisco. Román Ortega, *Introducción a la recuperación y reciclado de los metales no férreos*, 1.ª ed. Madrid: Instituto Tecnológico GeoMinero de España, 1992. Accedido: 2 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://books.google.com.pe/books?id=rUsjA8hBkLwC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- [11] J. Zhao *et al.*, «Industrial reheating furnaces: A review of energy efficiency assessments, waste heat recovery potentials, heating process characteristics and perspectives for steel industry», *Process Safety and Environmental Protection*, vol. 147, pp. 1209-1228, mar. 2021, doi: 10.1016/j.psep.2021.01.045.
- [12] L. M. Herrera Jumbo y E. A. Vásquez Torres, «Diseño, programación e instalación de un sistema de control de supervisión y adquisición de datos de un horno Lindberg para el



- laboratorio de tratamientos térmicos.», Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2011.
- [13] Wisconsin Oven, «Horno sin cita previa para servicio pesado (Serie SWH)». Accedido: 17 de enero de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.wisoven.com/products/walk-in-ovens/heavy-duty-walk-in-oven-swh-series>
- [14] B. Liu *et al.*, «Development of a New Vacuum Furnace and its Application for 650 MHz Superconducting Cavities», *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, pp. 1-6, nov. 2023, doi: 10.1109/tasc.2023.3332510.
- [15] E. L. Álvarez Monasterios, «Diseño y construcción de un horno eléctrico de tratamientos térmicos para la carrera de Mecánica Industrial.», Trabajo de grado, Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, 2023.
- [16] S. Kumar Dutta y Y. Chokshi, *Basic Concepts of Iron and Steel Making*, 1.^a ed. Vadodara: Springer, 2020.
- [17] A. Iagar, G. Popa, y C. Dinis, «Experimental Analysis of a High-Frequency Induction Furnace and its Impact on Power Quality», *ATEE*, pp. 1-9, marzo 2019.
- [18] S. Bazzana, P. Hegoburu, M. Ordoñez, y D. Pieck, «Hornos y tratamientos térmicos», Mendoza, 2008.
- [19] CarboSystem, «Tipos de hornos industriales», CarboSystem. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://carbosystem.com/tipos-de-hornos-industriales/>
- [20] Y. Toulouevski y I. Zinurov, *Innovation in Electric Arc Furnaces*, 2.^a ed. London: Springer, 2013.
- [21] Alibaba, «Horno eléctrico por resistencia», Alibaba. Accedido: 21 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://spanish.alibaba.com/product-detail/Photoceramics-Temperature-1100-CELSIUS-ELECTRIC-CERAMIC-62540899619.html>
- [22] Gamma Erecos, «RL 30 Ladrillos Refractarios», Sabaneta, diciembre 2021.
- [23] Gamma Erecos, «AQ 60. Ladrillos refractarios», 2021.
- [24] Industrial Comercial Chile, «Concreto refractario», Santiago, 2020.
- [25] Maquinarias Henriques C.A., «Manta de Fibra Cerámica», Quito, 2024.
- [26] KANTHAL, «KANTHAL A-1. Alambre de calentamiento por resistencia y alambre de resistencia», Hallstahammar, 2024.
- [27] Panel y Acanalados Monterrey, «Acero A36: Propiedades y Usos». Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://panelyacanalados.com/blog/acero-a-36-propiedades-y-usos/>
- [28] Dipac, «AISI 304», Ibarra, 2022.
- [29] Pirotec Burners, «Termopar o termocupla tipo K Serie PBTK», Envigado, octubre 2022. [En línea]. Disponible en: www.pirotecburners.com
- [30] Toky, «Controlador de temperatura inteligente Serie TP». Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.toky.com.cn/showprod/?ID=233>
- [31] Coelsa, «Relé de estado sólido Maxwell 60A», Coelsa. Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.coelsa.com.gt/productos/MS-1DA4860>



- [32] Schneider Electric, «Interruptor termomagnético Easy9». Accedido: 19 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.se.com/pe/es/product/EZ9F34250/interruptor-termomagn%C3%A9tico-easy9-riel-2p-50a-45ka-curva-c/?range=65817-dispositivos-easy-9&parent-subcategory-id=1665&selectedNodeId=112434285659>
- [33] Schneider Electric, «Interruptor selector», Schneider Electric. Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://www.se.com/co/es/product/XB4BD21/interruptor-selector-negro-%C3%B8-22mm-2-posiciones-1-na/>
- [34] Viox Electric, «Luz indicadora AD22-22DS». Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://viox.com/product/indicator-light-ad22-22ds/>
- [35] Intertek, «Control de temperatura industrial de Oven Industries». Accedido: 12 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.ovenind.com/resources/learning/>
- [36] D. A. Guayasamin Caiza y R. V. Pinargo Oña, «Análisis de los modelos de transferencia de calor en productos cárnicos utilizando hornos a gas», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2017.
- [37] F. Incropera y D. DeWitt, *Fundamentos de transferencia de calor*, 4.^a ed. México: PEARSON, 1996.
- [38] Watlow, «El coeficiente de expansión térmica y su sistema de calefacción». Accedido: 19 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.watlow.com/es-es/blog/posts/the-coefficient-of-thermal-expansion-and-your-heating-system>
- [39] D. A. Sáchica-Herrera, J. C. Giraldo, y C. E. Jácome-Muñoz, «Estudio de la velocidad de ascenso y fuerza boyante en un termal con convección libre», *DYNA (Colombia)*, vol. 84, n.º 200, pp. 53-61, 2017, doi: 10.15446/dyna.v84n200.56853.
- [40] J. Antonio Echeverría, A. I. Menéndez-Pérez, E. I. Lázaro García-Moya, y D. I. Sacasas-Suárez, «Estudio numérico de intercambiadores de calor compactos empleando generadores de vórtices con forma de paralelogramo», *Revista de Ingeniería Mecánica*, enero 2020, [En línea]. Disponible en: <http://www.ingenieriamecanica.cujae.edu.cu>
- [41] M. Groover, *Fundamentos de manufactura moderna*, 3.^a ed. México: McGraw-Hill, 2007.
- [42] M. Becerra Rodríguez, V. Aguilar Díaz, J. Bernardino González, y F. Santana Ramírez, «Tratamientos térmicos», *Tepexi*, vol. 8, n.º 15, enero 2021.
- [43] materialesbuap, «Clasificación de los materiales», materialesbuap. Accedido: 26 de octubre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://materialesbuap2013.weebly.com/clasificacioacuten-de-los-materiales.html>
- [44] A. Mocchiari, M. B. Lombardi, y A. N. Scian, «Desarrollo de materiales cerámicos refractarios de baja densidad a partir de agentes ligantes nanoestructurados y carbón», *Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio*, vol. 56, n.º 6, pp. 243-248, noviembre 2017, doi: 10.1016/j.bsecv.2017.05.003.
- [45] J. Coreño-Alonso y M. Teresa Méndez-Bautista, «Relación estructura-propiedades de polímeros», *Universidad Nacional Autónoma de México*, 2017.
- [46] J. Rodríguez Montes, L. Castro Martínez, y J. C. del Real Romero, *Procesos industriales para materiales metálicos*, 2.^a ed. Madrid: Visión Net, 2015. Accedido: 10 de diciembre



- de 2023. [En línea]. Disponible en:
<https://books.google.com.pe/books?id=SVBGgraQiREC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false>
- [47] Á. P. Cumbajin Arguero y J. C. Andrango Arias, «Análisis de la dureza superficial del acero AISI 01 (K460) sometido a tratamientos térmicos de templeado y revenido utilizando como medio de enfriamiento aceites automotrices de diferentes viscosidades», Trabajo de grado, Universidad Politécnica Salesiana, Quito, 2022.
- [48] B. M. Pillajo Corella y F. I. Romero Velasco, «Diseño y construcción de un horno calentado por resistencias eléctricas que trabaje en un rango de temperaturas entre 1000 y 1350 grados centígrados, y controlado por un sistema computarizado», Trabajo de grado, Escuela Politécnica Nacional, Quito, 2016.
- [49] M. Marín, A. Porrello, C. Alfonzo, y S. Cabello Sequera, «Determinación de la curva S-N-P a través del método Maennig para el acero AISI 1045 sometido a un tratamiento térmico de normalizado.», *Revista INGENIERÍA UC*, vol. 21, n.º 3, pp. 39-40, diciembre 2014.
- [50] H. D. Patiño Duque y B. D. Rosero Coral, «Tratamiento térmico de temple, influencia del medio de enfriamiento», *Journal de Ciencia e Ingeniería*, vol. 8, n.º 1, pp. 53-54, agosto 2016, [En línea]. Disponible en: <https://www.researchgate.net/publication/320295979>
- [51] Universidad Nacional Mayor de San Marcos, «Temple y revenido», en *Metalografía y tratamientos térmicos*, 1.ª ed., vol. 10, Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, 2022, 10, pp. 14-14.
- [52] H. S. Dhami, N. D. Kumar, T. Tharian, C. P, y K. Viswanathan, «Microstructure and mechanical properties of Heat-Treated high nitrogen martensitic stainless steel», *Department of Mechanical Engineering*, marzo 2022, [En línea]. Disponible en: <http://arxiv.org/abs/2203.15868>
- [53] ASTM International, «Standard Test Methods for Rockwell Hardness of Metallic Materials», West Conshohocken, marzo 2015.
- [54] International Standard, «Metallic materials - Rockwell hardness test - ISO 6508-1», Switzerland, 2023.
- [55] International Standard, «Ergonomics of the thermal environment - Methods for the assessment of human responses to contact with surfaces», Switzerland, 2006.
- [56] Climate Data, «Clima Ibarra: Temperatura, Climograma y Tabla climática para Ibarra», Climate Data. Accedido: 6 de abril de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://es.climate-data.org/america-del-sur/ecuador/provincia-de-imbabura/ibarra-2964/>
- [57] Maquinarias Henriques C.A., «The technical index of Mullite insulation vrick 1350°C», 2024.
- [58] Maquinarias Henriques C.A., «Mortero seco», Quito, 2024.
- [59] AliExpress, «Sensor de termopar tipo K de alta temperatura.» Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en:
<https://es.aliexpress.com/item/1005001476966712.html#nav-specification>
- [60] Toky, «Controlador de temperatura inteligente Serie TP», Zhongshan, febrero 2022.



- [61] MaxWell, «Relé de estado sólido de carga de CA con entrada de CC», MaxWell. Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: https://www.maxwell-fa.com/dc-input-ac-load-solid-state-relay_p40.html
- [62] Schneider Electric, «Interruptor termomagnético Easy9», Quito, diciembre 2024.
- [63] Schneider Electric, «Interruptor selector», Quito, noviembre 2024.
- [64] CEIV, «Foco Piloto LED», CEIV. Accedido: 7 de noviembre de 2024. [En línea]. Disponible en: <https://ceiv.com.mx/ad22-22ds/>
- [65] Dipac, «Planchas laminadas en caliente», Ibarra, 2024.
- [66] PerfectPrime, «Cámara de Imagen Térmica IR0019», Markham, 2020.
- [67] Motic, «Microscopio estereomicroscopio ST-30C-2LOO, 20x/40x». Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.micro-pro.com/es/lupas-estereo/motic-microscopio-estereo-st-30c-2loo-20x-40x/p,59372>
- [68] Qualitest advanced testing technologies, «Guía definitiva sobre el durómetro». Accedido: 20 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.worldoftest.com/es/ultimate-guide-vickers-hardness-tester-everything-you-need-know>
- [69] Y. Cengel, M. Boles, y M. Kanoglu, *Termodinámica*, 9.^a ed. 2019.
- [70] Y. Cengel, *Transferencia de calor y masa*, 3.^a ed. México: McGraw Hill, 2007.
- [71] International Codes and Standards Organization, «NFPA 86: Standard for ovens and furnaces», National Fire Protection Association, Boston, 2015.
- [72] KANTHAL, «Alambre Kanthal A-1». Accedido: 10 de enero de 2025. [En línea]. Disponible en: <https://www.kanthal.com/es-es/productos/fichas-t%C3%A9cnicas-de-materiales/hilo/alambre-de-calentamiento-por-resistencia-y-alambre-de-resistencia/kanthal-a-1/>
- [73] KANTHAL, «Resistance Heating Alloys and Systems for Industrial Furnaces», 2001.
- [74] C. A. Jiménez Carballo, «Primera Ley de la Termodinámica», Cartago, 2018.
- [75] E. Brea, *Análisis de sistemas lineales asistido con Scilab*, 1.^a ed. Caracas: SafeCreative, 2014. [En línea]. Disponible en: <http://www.safecreative.org/user/1408151214335>
- [76] Europer, «Ficha técnica A36», Santiago, octubre 2021.
- [77] L. M. Pérez Fierro, Á. de J. Villegas Hernández, Y. G. Torres Hernández, y A. Altamirano Torres, «Efecto de la temperatura de normalizado sobre la microestructura y propiedades mecánicas de un acero AISI 1045», *Universidad Autónoma Metropolitana Revista tediq*, vol. 7, n.º 7, p. 2021, octubre 2021.
- [78] J. Apraiz Barreiro, *Tratamientos Térmicos de los Aceros*, 1.^a ed. Madrid: Nuevas Gráficas S.A., 1949.
- [79] Ó. F. Higuera Cobos, C. M. Moreno Téllez, y B. A. Suárez Tovar, «Evolución microestructural del acero austenítico al manganeso sometido a tratamiento térmico de temple y revenido», *Revista Ingenierías Universidad de Medellín*, vol. 9, n.º 17, pp. 195-206, octubre 2010.
- [80] SRC, «Tablas Emisividad para infrarrojos», Cantabria.
- [81] KANTHAL, «Resistance heating alloys and systems for industrial furnaces», enero 2018.



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



- [82] H. Covarrubias Ochoa y J. M. Medina Flores, «Predicción del esfuerzo de Von Mises generado en los álabes de un impulsor de una bomba centrífuga típica utilizando Ansys ADPL», *Pistas Educativas*, vol. 121, pp. 1-12, diciembre 2016, [En línea]. Disponible en: <http://itcelaya.edu.mx/ojs/index/php/pistas>
- [83] L. S. Arias Maya y L. Vanegas Useche, «Falla de los materiales compuestos laminados», *Scientia et Technica*, vol. 25, pp. 1-6, julio. 2004.
- [84] F. Beer, J. Russell, J. DeWolf, y D. Mazurek, *Mecánica de materiales*, 5.^a ed., vol. 5. México: McGrawHill, 2010.
- [85] Holcim, «Agregados finos», marzo 2022.



Anexos

- Anexo 1

Código para establecer el espesor de las paredes, temperaturas en diferentes puntos

```

clc; clear; close all;
%% Datos de entrada
T_Interior = 1200; T_Ambiente = 16;
epsilon = 0.66; sigma = 5.67e-8; h_c = 25;
materiales = [0.060, 0.20; 0.064, 0.47; 0.050, 0.22; 0.050, 0.22; 0.050, 0.22; 0.001, 15];
nombres = {'Ladrillo Mullita','Ladrillo Alúmina','Fibra Cerámica (1)',...
           'Fibra Cerámica (2)','Fibra Cerámica (3)','Chapa Metálica'};
%% Cálculo de resistencias
R_capas = materiales(:,1) ./ materiales(:,2);
R_total = sum(R_capas);
%% Iteración para obtener T_4
T_4 = 40; tol = 0.01; err = 1;
while err > tol
    Q_c = (T_Interior - T_4) / R_total;
    h_r = epsilon * sigma * ((T_4 + 273.25)^2 + (T_Ambiente + 273.15)^2) * ((T_4 + 273.25) + (T_Ambiente + 273.15));
    T_4_nuevo = Q_c / (h_c + h_r) + T_Ambiente;
    err = abs((T_4_nuevo - T_4) / T_4_nuevo);
    T_4 = T_4_nuevo;
end
%% Recalcula Q_c y temperaturas en las interfaces (T_j)
Q_c = (T_Interior - T_4) / R_total;
T_j = T_Interior - Q_c * cumsum(R_capas);
%% Impresión de resultados compactos
fprintf('\nT_Interior: %.2f C | T_Ambiente: %.2f C | Q_c: %.4f W/m²\n', T_Interior, T_Ambiente, Q_c);
for i = 1:length(nombres)
    fprintf('%s: %.2f C\n', nombres{i}, T_j(i));
end
%% Impresión de tabla de N de Capas y ΔT (C)
% Las diferencias de temperatura
dT1 = T_Interior - T_j(1); dT2 = T_j(1) - T_j(2); dT3 = T_j(2) - T_j(5); dT4 = T_j(5) - T_j(6); dT5 = T_j(6) - T_Ambiente;
fprintf('\nN Capas\ΔT (C)\n'); fprintf('---\t---\n'); fprintf('1\t%.2f\n', dT1); fprintf('1\t%.2f\n', dT2);
fprintf('3\t%.2f\n', dT3); fprintf('1\t%.2f\n', dT4); fprintf('---\t%.2f\n', dT5);
  
```



• **Anexo 2**

Código de cálculos térmicos

% Parámetros iniciales

$L_e = 0.57$; $A_e = 0.49$; $AL_e = 0.42$; % Dimensiones externas (m)
 $l_i = 0.28$; $a_i = 0.20$; $al_i = 0.23$; % Dimensiones internas (m)
 $T_{interior} = 1200$; $T_4 = 39.64$; $T_{Ambiente} = 16$; % Temperaturas (C)
 $L = [0.060, 0.064, 0.050, 0.001]$; % Espesores (m)
 $k_vals = [0.20, 0.47, 0.22, 15]$; % conductividades térmicas (W/mK)

% Transferencia de calor por conducción (W)

$A_T = 2 * (L_e * A_e + L_e * AL_e + A_e * AL_e) - 2 * (l_i * a_i + l_i * al_i + a_i * al_i)$; % Área efectiva (m²)
 $R_{Total} = \text{sum}(L ./ (k_vals * A_T))$; % Resistencia térmica total (K/W)
 $k = \text{sum}(L) / (R_{Total} * A_T)$; % Conductividad térmica equivalente (W/mK)

$Q_C = (k * A_T * (T_{interior} - T_4)) / \text{sum}(L)$;

% Transferencia de calor por convección (W)

$g = 9.8$; % Gravedad (m/s²)
 $\rho = 1.2208$; % Densidad del aire (kg/m³)
 $\nu = 1.4792e-5$; % Viscosidad cinemática del aire (m²/s)
 $Pr = 0.7323$; % Número de Prandtl
 $k_{aire} = 0.0248$; % Conductividad térmica del aire (W/mK)

$L_C = A_T / (4 * \text{sqrt}(A_T))$; % Longitud característica (m)

$\beta = 1 / (T_{Ambiente} + 273.15)$; % Coeficiente volumétrico de expansión térmica (K⁻¹)
 $\Delta T = T_4 - T_{Ambiente}$; $\Delta TK = \Delta T + 273.15$; $Gr = (\Delta TK * \beta) * ((L_C^3 * \rho^2 * g) / \nu^2)$; % Número de Grashof
 $Nu = 0.68 + (0.670 * (Gr * Pr)^{(1/4)}) / (1 + (0.492 / Pr)^{(9/16)})^{(4/9)}$; % Número de Nusselt
 $h_C = (Nu * k_{aire}) / L_C$; % Coeficiente de convección (W/m²K)

$Q_{Cv} = h_C * A_T * (T_4 - T_{Ambiente})$;

% Transferencia de calor por radiación (W)

$\epsilon = 0.66$; % Emisividad
 $\sigma = 5.67e-8$; % Constante de Stefan-Boltzmann (W/m²K⁴)
 $T_{interior_K} = T_{interior} + 273.15$; $T_{4_K} = T_4 + 273.15$; $T_{Ambiente_K} = T_{Ambiente} + 273.15$; % Conversión de temperaturas a Kelvin

$Q_r = \epsilon * \sigma * A_T * (T_{4_K}^4 - T_{Ambiente_K}^4)$;

% Transferencia de calor por la abertura (W)

$A_{abertura} = (A_e + 0.001) * (L_e) - (A_e * L_e)$; % Área de la abertura (m²)
 $Q_{PA} = \sigma * A_{abertura} * (T_{interior_K}^4 - T_{Ambiente_K}^4)$;

% Transferencia de calor hacia la probeta (W)

$m = 0.0787$; % Masa de la probeta (kg)
 $C_p = 0.5$; % Calor específico del acero A36 (kJ/kg.K)
 $t = 1020$; % Tiempo en segundos

$Q_A = (m * C_p * (T_{interior} - T_{Ambiente})) / t$;

% Pérdidas totales de calor en el horno (W)

$Q_{PT} = Q_C + Q_{Cv} + Q_r + Q_A + Q_{PA}$;



% Potencia del horno (W)

$$P_H = Q_{PT} * 3;$$

% Energía total requerida (W)

$$Q_{ET} = Q_{PT} + P_H;$$

% Calor absorbido por el aire (kJ)

$$V_c = l_i * a_i * al_i; \text{ \% Volumen de la cámara interna (m}^3\text{)}$$

% Interpolación de la densidad del aire a 16C

$$\rho_{1} = 1.225; \text{ \% Densidad a 15C (kg/m}^3\text{)}$$

$$\rho_{2} = 1.204; \text{ \% Densidad a 20C (kg/m}^3\text{)}$$

$$T1 = 15; T2 = 10;$$

$$\rho_{\text{Aire_Camara}} = \rho_{1} + ((16 - T1) * (\rho_{2} - \rho_{1})) / (T2 - T1);$$

$$m_a = \rho_{\text{Aire_Camara}} * V_c; \text{ \% Masa del aire en la cámara (kg)}$$

$$Cp_{\text{Aire}} = 1.007; \text{ \% Calor específico del aire (kJ/kg}\cdot\text{K)}$$

$$Q_{\text{Aire}} = m_a * Cp_{\text{Aire}} * (T_{\text{interior}} - T_{\text{Ambiente}});$$

% Período de calentamiento del aire en la cámara del horno (s)

$$t_a = 1822; t_{a_min} = t_a / 60;$$

% Calor necesario para calentar el horno (W)

$$h_r = 2820; \text{ \% Tiempo para calentar la pieza (s)}$$

$$Q_{tt} = (Q_{\text{Aire}} + Q_{PT}) / h_r + Q_{PT};$$

% Eficiencia del horno (%)

$$n = (Q_{tt} / (Q_{tt} + (Q_{PT} + Q_{PA}) / 10)) * 100;$$

% Masa total del horno (kg)

$$e_{\text{mullita}} = 0.060; e_{\text{alumina}} = 0.064; e_{\text{fibra}} = 0.050; e_{\text{acero}} = 0.001; \text{ \% Espesores de cada material (m)}$$

$$\rho = [8000, 800, 2450, 800]; \text{ \% Densidad aparente de los materiales (kg/m}^3\text{)}$$

$$V_{\text{externo}} = L_e * A_e * AL_e; \text{ \% Volumen externo}$$

$$V_{\text{interno}} = l_i * a_i * al_i; \text{ \% Volumen interno}$$

% Volumen por capas

$$V_{\text{acero}} = (l_i + 2 * e_{\text{acero}}) * (a_i + 2 * e_{\text{acero}}) * (al_i + 2 * e_{\text{acero}}) - V_{\text{interno}};$$

$$V_{\text{fibra}} = (l_i + 2 * (e_{\text{acero}} + e_{\text{fibra}})) * (a_i + 2 * (e_{\text{acero}} + e_{\text{fibra}})) * (al_i + 2 * (e_{\text{acero}} + e_{\text{fibra}})) - (V_{\text{acero}} + V_{\text{interno}});$$

$$V_{\text{alumina}} = (l_i + 2 * (e_{\text{acero}} + e_{\text{fibra}} + e_{\text{alumina}})) * (a_i + 2 * (e_{\text{acero}} + e_{\text{fibra}} + e_{\text{alumina}})) * (al_i + 2 * (e_{\text{acero}} + e_{\text{fibra}} + e_{\text{alumina}})) - (V_{\text{fibra}} + V_{\text{acero}} + V_{\text{interno}});$$

$$V_{\text{mullita}} = V_{\text{externo}} - (V_{\text{alumina}} + V_{\text{fibra}} + V_{\text{acero}} + V_{\text{interno}});$$

$$V_t = [V_{\text{acero}}, V_{\text{fibra}}, V_{\text{alumina}}, V_{\text{mullita}}]; \text{ \% Vector de volumen}$$

$$m_{\text{total}} = \text{sum}(\rho .* V_t);$$

% Resultados

fprintf('Área efectiva: %.4f m^2\n', A_T); fprintf('Resistencia térmica: %.6f K/W\n', R_Total,

Q_C); fprintf('Pérdidas por convección: %.2f W\n', Q_Cv); fprintf('Pérdidas por radiación: %.2f W\n', Q_r); fprintf('Pérdidas por

la abertura: %.2f W\n', Q_PA); fprintf('Pérdidas de calor hacia la probeta: %.2f W\n', Q_A); fprintf('Pérdidas totales de calor en

el horno: %.2f W\n', Q_PT); fprintf('Potencia del horno: %.2f W\n', P_H); fprintf('Energía total requerida: %.2f W\n', Q_ET);

fprintf('Calor absorbido por el aire: %.2f kJ\n', Q_Aire); fprintf('Tiempo de calentamiento del horno: %.2f min\n', t_a_min);

fprintf('Calor necesario para calentar el horno: %.2f W\n', Q_tt); fprintf('Eficiencia del horno: %.2f%%\n', n); fprintf('Masa total

del horno: %.2f kg\n', m_total);

%% 2.2.2 Cálculos de Elementos Calefactores



UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO



```

% Potencia de las resistencias eléctricas
Q_Potencia = (T_interior - T_Ambiente) / R_Total;
% Corriente eléctrica
V = 220; % Tensión de alimentación
I = P_H / V;
% Resistencia eléctrica equivalente
R_eq = P_H / I^2;
% Resistencias R1 y R2
R1 = 13.25; R2 = 13.25;
% Resistencia total en el sistema
R_s = 1 / (1 / R1 + 1 / R2);
% Resistencia en caliente
R_cal = R_eq;
% Resistencia a temperatura ambiente
Ct = 1.04; % Coeficiente de resistividad
R_amb = R_cal / Ct;
% Diámetro del hilo (cm)
p = 3.8; % Carga específica (W/cm²)
D_h = (Q_Potencia^2 * Ct) / (V^2 * p);
d = 1.1 / 10; % Diámetro del hilo (cm)
d_mm = 1.1; % Diámetro del hilo (mm)
% Longitud del alambre
pi = 3.1416;
L_Alambre_cm = Q_Potencia / (pi * d * p); L_Alambre = L_Alambre_cm / 100;
% Diámetro externo de la espira
D_mm = 5 * d_mm; D = D_mm / 1000;
% Número de espiras
n = (1000 * L_Alambre) / (pi * (D_mm - d_mm));
% Longitud de la espira comprimida
L_cmm = n * d_mm; L_c = L_cmm / 1000;
% Paso de arrollamiento
s_mm = 3 * d_mm; s = s_mm / 1000;
% Longitud de la espira extendida
L_emm = s_mm * n; L_e = L_emm / 1000;
% Mostrar resultados
fprintf('Potencia de las resistencias eléctricas: %.2f W\n', Q_Potencia); fprintf('Corriente eléctrica requerida: %.2f A\n', I);
fprintf('Resistencia eléctrica equivalente: %.2f Ω\n', R_eq); fprintf('Resistencia total en el sistema : %.2f Ω\n', R_s);
fprintf('Resistencia en caliente: %.2f Ω\n', R_cal); fprintf('Resistencia a temperatura ambiente : %.2f Ω\n', R_amb);
fprintf('Diámetro del hilo: %.4f cm^2/Ω\n', D_h); fprintf('Longitud del alambre: %.2f m\n', L_Alambre); fprintf('Diámetro de la
espira: %.4f m\n', D); fprintf('Número de espiras: %.2f\n', n); fprintf('Longitud de la espira comprimida: %.4f m\n', L_c);
fprintf('Paso de arrollamiento: %.4f m\n', s); fprintf('Longitud de la espira extendida: %.4f m\n', L_e);
    
```



- Anexo 3

Medidas del ensayo de dureza por grupos

Material base sin tratamiento térmico						
Codificación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
A36-LC-T[1]-1	75	77	78	76	75	76.20
A36-LC-T[1]-2	73	76	77	75	77	75.60
A36-LC-T[1]-3	77	78	78	80	79	78.40
A36-LC-T[1]-4	79	80	80	78	79	79.20
A36-LC-T[1]-5	79	77	78	76	76	77.20
Promedio						77.32

Probetas templadas						
Codificación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
A36-LC-T[2]-6	80	82	81	83	85	82.2
A36-LC-T[2]-7	81	78	79	83	82	80.6
Promedio						81.40

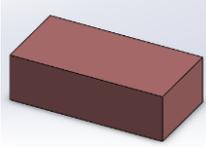
Probetas templadas y revenidas						
Codificación	Medida 1	Medida 2	Medida 3	Medida 4	Medida 5	Promedio
A36-LC-T[3]-8	65	67	66	64	65	65.4
A36-LC-T[3]-9	67	69	68	65	70	67.8
A36-LC-T[3]-10	64	60	65	66	64	63.8
Promedio						65.66



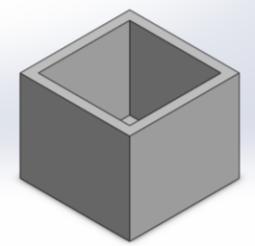
• **Anexo 4**

Diseño CAD

Ladrillo refractario		
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	150	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.2	N/D
Módulo cortante	40000	N/mm ²
Densidad de masa	2350	kg/m ³
Límite de tracción	30	N/mm ²
Límite de compresión	250	N/mm ²
Límite elástico	70	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	6.5*10 ⁻⁶	/K
Conductividad térmica	0.736	W/(m*K)
Calor específico	0.96	J/(kg*K)

Imagen 

Ladrillo aislante liviano de mullita		
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	100	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.2	N/D
Módulo cortante	2000	N/mm ²
Densidad de masa	1050	kg/m ³
Límite de tracción	2	N/mm ²
Límite de compresión	15	N/mm ²
Límite elástico	10	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	5.5*10 ⁻⁶	/K
Conductividad térmica	0.22	W/(m*K)
Calor específico	800	J/(kg*K)

Imagen 

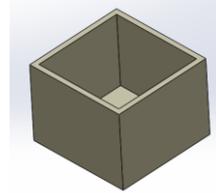


UNIVERSIDAD TÉCNICA DEL NORTE
 Acreditada Resolución Nro. 173-SE-33-CACES-2020
FACULTAD DE INGENIERÍA EN CIENCIAS APLICADAS
SUBDECANATO

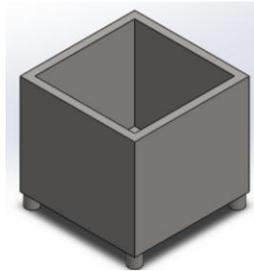


Recubrimiento de fibra cerámica		
Propiedad	Valor	Unidades
Módulo elástico	$1.5 \cdot 10^{10}$	N/mm ²
Coefficiente de Poisson	0.2	N/D
Módulo cortante	$1 \cdot 10^{10}$	N/mm ²
Densidad de masa	128	kg/m ³
Límite de tracción	40000	N/mm ²
Límite de compresión	120000	N/mm ²
Límite elástico	60000	N/mm ²
Coefficiente de expansión térmica	$4 \cdot 10^{-6}$	/K
Conductividad térmica	0.22	W/(m*K)
Calor específico	1130	J/(kg*K)

Imagen

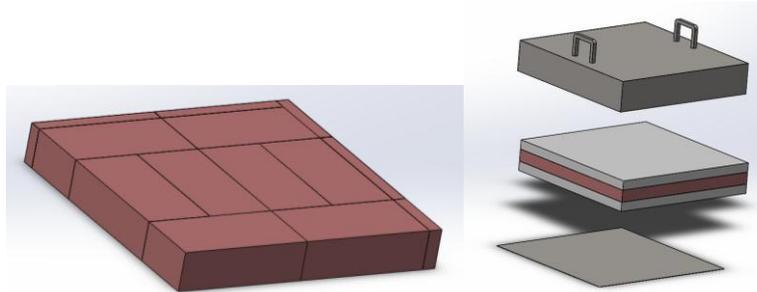


Recubrimiento de acero inoxidable



Nota: Las propiedades del acero inoxidable son proporcionadas por el mismo software de simulación.

Tapa del horno



Nota: El diseño y montaje de la tapa fue desarrollado de manera similar al del horno, siguiendo la misma distribución para su ensamble.



- **Anexo 5**

Desarrollo de la Ecuación de Forma General y Parámetros del sistema

La ecuación original del Balance de Calor se expresa en la Ecuación 64.

Sabiendo la forma de Q_A , Q_B y Q_C expresados en la Ecuación 64, Ecuación 65 y Ecuación 66, se reemplaza y se desarrolla la expresión hasta obtener la Forma General que se expresa en la Ecuación 52. Este desarrollo se muestra a continuación:

- **Transferencia de calor**

Para obtener la Ecuación 52 se sustituye Q_B y Q_C en la Ecuación 64 obteniendo la expresión:

$$\frac{U^2}{R} - C_A \frac{dT_A}{dt} = (C_B + C_C) \frac{dT_D}{dt}$$

Donde: $\frac{U^2}{R}$ se refiere al calor generado por las resistencias.

Se puede expresar T_D en términos de T_A a partir de la forma de Q_B , como se muestra a continuación:

$$T_D = C_A R_{PC} \frac{dT_A}{dt} + T_A$$

Sustituyendo T_D en la expresión calculada anteriormente, se desarrolla y se obtiene la Ecuación 52 de la Forma General.

- **Cálculo de capacitancias**

Las capacitancias se determinan con la siguiente ecuación: $C_x = m * C_p$; en donde m = masa necesaria y C_p = calor específico necesario.

- **Capacitancia probeta C_A**

Volumen de la probeta

$$Vol_{probeta} = l * b * h = 0.05m * 0.05m * 0.004m = 0.00001m^3$$

Densidad y calor específico de la probeta

Material	Densidad ρ , $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Calor específico, $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K}\right)$
Acero A36	7870	0.500

Tomado: Adaptado de Láminas en caliente, Acero A36 (2022) [85] y Cengel Tabla A-3 pag 887 Apéndice 1 [69].

Entonces la masa es:

$$m = \rho * v = 7870 \left(\frac{kg}{m^3}\right) * 0.00001m^3 = \mathbf{0.0787 kg}$$



La capacitancia C_A se muestra en la Tabla 26.

- **Capacitancia de la fuente de calor C_B a 910C (normalizado)**

Temperatura (C)	Densidad ρ , $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$	Calor específico, $\left(\frac{kJ}{kg \cdot K}\right)$
910	0.3008	1.169

Tomado: Libro Cengel Tabla A-15 pag 7367 Apendice 1 [69].

$$m = \rho * v = 0.3008 \frac{kg}{m^3} * 0.01352m^3 = \mathbf{0.004067kg}$$

La capacitancia C_B se muestra en la Tabla 26.

- **Capacitancia de las paredes C_C**

La capacitancia C_C se muestra en la Tabla 26.

- **Funcionamiento del sistema con controlador**

Tenemos la ecuación:

$$-1.61 = -\left(\frac{\xi\pi}{\sqrt{1-\xi^2}}\right)$$

Resolviendo, obtenemos el factor de amortiguamiento ξ . Con el factor de amortiguamiento se determina la frecuencia natural ω_n . Los valores de ξ y ω_n se muestran en la Tabla 27.

Para desarrollar la función de transferencia de segundo orden se debe considerar al polo dominante en función de ξ y ω_n .

$$s = -0.456 * 0.045 \pm 0.045 \sqrt{1 - 0.456^2j} = -0.020 \pm 0.040j$$

- **Cálculo de ángulos y parámetros**

Parámetros	Desarrollo	Resultado
β_A	$180 - \tan^{-1}\left(\frac{0.040}{-0.020}\right)$	243.435
β_B	$180 - \tan^{-1}\left(\frac{0.040}{0.981}\right)$	177.665
ϕ_A	$180 - \tan^{-1}\left(\frac{0.040}{14.98}\right)$	179.847
Condición de fase	$\phi_B = \beta_A + \beta_B - \phi_A - 180$	61.25
ϕ_B	$\tan^{-1}\left(\frac{0.040}{b - 0.020}\right)$	$\tan(61.25) = \frac{0.040}{b - 0.020}$
b	$\frac{0.040 + 0.037}{1.83}$	0.042
K	$\left \frac{10.90K * (\sqrt{14.98^2 + 0.040^2}) * (\sqrt{-0.022^2 + 0.040^2})}{(\sqrt{-0.020^2 + 0.040^2}) * (\sqrt{0.981^2 + 0.040^2})} \right = 1$	0.00623



• **Anexo 6**

Valores de Temperatura vs Tiempo obtenidos en los tratamientos térmicos

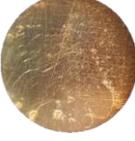
NORMALIZADO				
Temperatura calentamiento teórico (C)	Temperatura de calentamiento real (C)	Tiempo de calentamiento teórico (min)	Tiempo de calentamiento real (min)	Error (%)
16	16	0	0	0
100	101	0	0,09	1
200	203	1	1	1,5
300	301	2	2	0,333333333
400	403	2	2	0,75
500	502	3	3	0,4
600	601	4	4	0,166666667
700	702	5	5	0,285714286
800	802	7	7	0,25
900	899	10	10	0,111111111
910	910	10,4	10,4	0

TEMPLE				
Temperatura calentamiento teórico (C)	Temperatura de calentamiento real (C)	Tiempo de calentamiento teórico (min)	Tiempo de calentamiento real (min)	Error (%)
16	16	0	0	0
100	101	0	0,09	1
200	203	1	1	1,5
300	301	2	2	0,333333333
400	403	2	2	0,75
500	502	3	3	0,4
600	601	4	4	0,166666667
700	702	5	5	0,285714286
800	802	7	7	0,25
840	841	10	8,6	0,119047619

REVENIDO				
Temperatura calentamiento teórico (C)	Temperatura de calentamiento real (C)	Tiempo de calentamiento teórico (min)	Tiempo de calentamiento real (min)	Error (%)
16	16	0	0	0
50	49	0	0,04	2
100	101	0	0,09	1
150	151	1	0,5	0,666666667
200	203	1	1	1,5
250	251	2	1,5	0,4
300	301	2	2	0,333333333



• **Anexo 7**

Procedimiento de lijado de probetas	
Descripción	Imagen
<p>La probeta inicial, sin haber sido lijada, muestra marcas, desprendimiento de material, bordes irregulares, textura rugosa y desigual, además de áreas con acumulaciones de material y residuos superficiales.</p>	
<p>Lija 150: Se inicia el proceso de lijado con una lija de grano 150, la cual se caracteriza por su alta capacidad abrasiva y resulta adecuada para el desbaste inicial. Elimina la capa superficial quemada y el material desprendido tras la exposición a altas temperaturas.</p>	
<p>Lija 180: Posteriormente, se emplea una lija de grano 180 para continuar con la remoción de marcas asociadas al material desprendido; en esta etapa se evidencian rayaduras desordenadas que dejan huellas en la superficie de la probeta.</p>	
<p>Lija 240: La aplicación de la lija, de grano fino, reduce significativamente las marcas visibles en la superficie. El resultado evidencia un avance hacia una textura más uniforme.</p>	
<p>Lija 280: Esta lija ayuda a eliminar los rastros restantes de imperfecciones e impurezas, por ello se muestra mayor uniformidad en la superficie de probeta.</p>	
<p>Lija 360: Al emplear esta lija, la textura de la probeta mejora notablemente. Se puede observar la superficie con un estado más suave y homogéneo.</p>	
<p>Lija 400: El uso de esta lija asegura una superficie completamente homogénea y libre de imperfecciones visibles. En esta fase se destaca un nivel avanzado de uniformidad.</p>	
<p>Lija 1000: La lija 1000 está diseñada para eliminar las marcas residuales más pequeñas y prepara la superficie para el pulido final, en esta etapa se observa una textura pulida casi en su totalidad.</p>	
<p>Lija 1200: Utilizada en la etapa final, elimina las líneas residuales de las etapas previas; la inspección con microscopio confirma que la superficie está lista para tratamientos térmicos o ensayos de propiedades mecánicas.</p>	