



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Diseño Mecánico de un Horno de Tratamiento Térmico para  
Aplicaciones Metal-Mecánicas a nivel Prototipo”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Erik José Martínez Vital

TUTORES:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Pabellón de Arteaga, Ags., febrero del 2026



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO®



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA**  
**SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA**  
**DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS**

Tesis:

**“DISEÑO MECÁNICO DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO  
PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS A NIVEL PROTOTIPO”**

Presenta:

Erik José Martínez Vital

Dirigida por:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Pabellón de Arteaga, Ags., febrero del 2026

## AGRADECIMIENTOS

Esta Tesis representa el cierre de una importante etapa en mi vida, y su culminación no habría sido posible sin el apoyo incondicional de todas aquellas personas que han caminado a mi lado durante este trayecto.

En primer lugar, quiero expresar mi más profundo agradecimiento a mi familia, mi pilar fundamental y fuente inagotable de fortaleza. A ustedes, que no solo me brindaron el apoyo emocional y mental necesario para enfrentar cada desafío, sino que también me enseñaron que soy capaz de superar cualquier obstáculo que se presente en mi camino. Su sacrificio y esfuerzo por ofrecerme la oportunidad de cursar esta carrera han sido invaluable; sé que cada logro mío es también un logro de ustedes, fruto de su dedicación por construir un mejor futuro para todos. Gracias por creer en mi capacidad incluso cuando yo mismo dudaba, por estar presentes en los momentos más difíciles, por su paciencia infinita, su comprensión sin límites, su ayuda desinteresada y ese cariño que ha sido mi refugio en las tormentas académicas y personales. Cada palabra de aliento, cada abrazo y cada gesto de confianza han sido la luz que iluminó mi camino cuando la incertidumbre amenazaba con detenerme.

A todos los docentes que compartieron generosamente su conocimiento y experiencia, gracias por ser mucho más que transmisores de información. Ustedes despertaron en mí la curiosidad por temas que jamás imaginé que podrían fascinarme, ampliaron mis horizontes intelectuales y me enseñaron a pensar de manera crítica y creativa. Su pasión por la enseñanza y su dedicación a la formación de profesionales íntegros han sido una fuente constante de inspiración. Gracias por cada lección, por sus exigencias que me hicieron crecer, y por creer en el potencial de sus estudiantes.

A mis compañeros de carrera, tanto a quienes aún permanecen en mi vida como a aquellos con quienes los caminos se separaron, les agradezco por haber convertido esta experiencia en algo memorable. Juntos compartimos no solo conocimientos y proyectos, sino también risas, desveladas, frustraciones y victorias. Cada conversación, cada debate y cada momento de colaboración enriqueció mi perspectiva y me motivó a ser mejor. Gracias por su amistad, su compañerismo y por demostrarme que el éxito es más gratificante cuando se construye en comunidad.

Finalmente, quiero agradecer a cada persona que ha cruzado mi vida hasta este punto, aunque sea brevemente. Cada encuentro, cada experiencia compartida y cada lección aprendida –ya fuera en momentos de alegría o de adversidad– ha dejado una huella en mi formación como persona y como profesional. Todos ustedes, de una u otra manera, contribuyeron a moldear quien soy hoy y me proporcionaron las herramientas necesarias para alcanzar esta meta. Sus enseñanzas, consejos y ejemplos han sido piezas fundamentales en el complejo rompecabezas que representa concluir esta carrera.

A todos ustedes, mi más sincero agradecimiento. Este logro es tanto mío como de quienes creyeron en mí y me acompañaron en este viaje.

-EJMV

Pabellón de Arteaga, Ags.,

07/enero/2026

**M. en C. EDINGUER VÁZQUEZ AYALA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS**

**PRESENTE**

Por medio del presente doy el visto bueno a la Tesis de Licenciatura titulada **“DISEÑO MECÁNICO DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS A NIVEL PROTOTIPO”** del estudiante **ERIK JOSÉ MARTÍNEZ VITAL** con numero de control 211050161 de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizó los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*Tierra Siempre fértil®*



**MII. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO**  
**MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL**



**M. en C. VÍCTOR MANUEL HERRERA AMBRIZ**  
**MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL**



**DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR**  
**MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL**

Pabellón de Arteaga, Ags.,

08/enero/2026

**ERIK JOSÉ MARTÍNEZ VITAL**  
**ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA**  
**NO. DE CONTROL 211050161**

**PRESENTE**

Por medio de este conducto me permito comunicar a Usted que habiendo recibido los votos aprobatorios de los revisores de su trabajo de Tesis titulado: **“DISEÑO MECÁNICO DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS A NIVEL PROTOTIPO”**, hago de su conocimiento que puede imprimir dicho documento y continuar con los trámites para la presentación de su acto protocolario de titulación integral por Tesis.

Sin otro particular, aprovecho la ocasión para enviarle un cordial saludo, quedo de Usted.

**ATENTAMENTE**

*Excelencia en Educación Tecnológica®*  
*Tierra Siempre fértil®*



**M. en C. EDINGUER VÁZQUEZ AYALA**  
**JEFE DEL DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS**



## RESUMEN

### “DISEÑO MECÁNICO DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS A NIVEL PROTOTIPO”

Por: **ERIK JOSE MARTÍNEZ VITAL**

El tratamiento térmico es un proceso que provoca cambios en la estructura interna de materiales metálicos sin cambiar su forma. Este tipo de procesos requiere el uso de tecnología capaz de controlar el calentamiento, el remojo y el enfriamiento de los metales. Dentro de este tipo de tecnologías se dispone de dispositivos denominados hornos, los cuales permiten ejecutar operaciones de endurecimiento, templado, recocido, normalizado, revenido y temple de piezas metálicas. En este contexto, un horno de tratamiento térmico permite alcanzar y mantener temperaturas elevadas de manera uniforme, garantizando la repetibilidad y calidad del tratamiento aplicado a las piezas metálicas. En este trabajo, se desarrolló una metodología para diseñar y manufacturar un horno industrial de tratamiento térmico para aplicaciones metal-mecánicas de 1100×1085×1595 mm con una cámara térmica de 0.52 m<sup>3</sup> revestida con ladrillo refractario y empleando 3 placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas 2” 4000W 220V 40×60 cm, además se integró un equipo de control de temperatura con termopar tipo-K de 1300 °C. Los diseños mecánicos fueron elaborados en Solidworks® y técnicas de básicas de manufactura y de mampostería refractaria fueron empleadas para su construcción. La presente Tesis es resultado del proyecto con numero de clave 21463.24-P del TecNM y constituye una extensión más amplia y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue desarrollado de manera grupal. En este contexto, se establecieron nuevas metas y objetivos con mayor pertinencia, a fin de conformar un proyecto integral de titulación mediante Tesis. Este trabajo forma parte de un proyecto global orientado al diseño y construcción de un horno de tratamiento térmico, por lo que el estudio se llevó a cabo bajo una dinámica conjunta, atendiendo a los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente. En consecuencia, los productos entregables de los participantes comparten las secciones básicas del documento de Tesis, diferenciándose únicamente en los resultados obtenidos en los distintos módulos de proceso.

Este estudio presenta los logros alcanzados de la etapa de diseño mecánico y estructural. El horno se definió bajo una configuración geométrica tipo caja con dimensiones suficientes para realizar el tratamiento térmico de piezas de hasta 1×0.5×0.7 m bajo temperaturas por encima de los 1000 °C.

Dirigido por:

**MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo**

**M. en C. Víctor Manuel Herrera Ambriz**

**Dr. José Alonso Dena Aguilar**

## ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>I. INTRODUCCIÓN</b> .....	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	3
1.2.1 Objetivo general.....	3
1.2.2 Objetivos específicos.....	3
1.3 JUSTIFICACIÓN.....	3
1.4 HIPÓTESIS.....	4
1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES.....	4
1.6 GENERALIDADES.....	4
<b>II. MARCO TEÓRICO</b> .....	5
2.1 TRATAMIENTO TÉRMICO PARA COMPONENTES MECÁNICOS .....	5
2.2 PROPIEDADES DEL TRATAMIENTO TÉRMICO.....	7
2.2.1 Métodos de ensayo de dureza para aceros.....	8
2.2.2 Selección del método de ensayo para aceros.....	12
2.2.3 Resistencia mecánica.....	12
2.2.4 Tipos de resistencia mecánica en los aceros.....	13
2.3 HORNOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	15
2.3.1 Clasificación de los hornos de tratamiento térmico.....	15
2.3.2 Componentes principales de los hornos.....	17
2.3.3 Eficiencia energética y consideraciones operativas.....	18
2.4 DISEÑO DE HORNOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	19
2.4.1 Consideraciones de diseño estructural y térmico.....	21
2.5 MANUFACTURA DE HORNOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	23
<b>III. METODOLOGÍA</b> .....	27
3.1 DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO.....	27
3.1.1 Diseño de la estructura de soporte.....	29
3.1.2 Diseño del recubrimiento externo de seguridad.....	30
3.1.3 Diseño de la cámara térmica.....	31
3.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TÉRMICO.....	34

	Pág.
<b>IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN</b> .....	37
4.1 DISEÑOS MECÁNICOS OBTENIDOS.....	37
4.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN.....	43
<b>V. CONCLUSIONES</b> .....	46
<b>VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> .....	47
<b>ANEXO 1.</b> Empresas o talleres nacionales dedicadas al servicio de tratamiento térmico industrial.....	51
<b>ANEXO 2.</b> Acceso universal al conocimiento: difusión y divulgación científica.....	53

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Pág.
1 Tipos de tratamientos térmicos.....	6
2 Tratamiento térmico de temple.....	7
3 Operario inspeccionando la dureza del material con un durómetro Leeb portátil.....	8
4 Procedimiento de tres pasos del ensayo de dureza Rockwell, mostrando la aplicación de pre-carga, carga total y medición de la profundidad de indentación permanente.....	11
5 Horno de tratamiento térmico con atmósfera controlada.....	17
6 Diagrama esquemático de los componentes principales de un horno de tratamiento térmico.....	18
7 Horno de tratamiento térmico tipo mufla mostrando sus componentes principales.....	20
8 Diagrama de fases Fe-C.....	21
9 Resistencias eléctricas en espiral de aleación Níquel-Cromo.....	24
10 Ladrillos refractarios utilizados en la construcción de cámaras de calentamiento para hornos de tratamiento térmico.....	25
11 Dibujo técnico del horno de tratamiento térmico propuesto.....	28
12 Estructura de soporte del horno.....	30
13 Recubrimiento externo de seguridad: vista de placas y piso cerámico integrado a la estructura....	31
14 Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios sin placas de cerámica.....	32
15 Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios con placas de cerámica.....	32
16 Cámara térmica completa y con sellado de mortero en cúpula y puerta.....	33
17 Puerta de cierre hermético con sistema de bisagras: vista exterior.....	33
18 Puerta de cierre hermético con sistema de bisagras: vista interna.....	34
19 Construcción del mallado del diseño del equipo para análisis estructural y térmico.....	35
20 Diseño mecánico completo del horno de tratamiento térmico.....	37
21 Estructura de soporte del horno, vista de la base principal.....	38
22 Recubrimiento externo de seguridad, vista de la estructura con placas.....	38
23 Cámara térmica con el recubrimiento externo de seguridad.....	39
24 Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios sin placas de cerámica.....	40
25 Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios con placas de cerámica.....	40
26 Cámara térmica completa y con sellado de mortero en cúpula y puerta.....	41
27 Recubrimiento de piso cerámica relativo a la cámara térmica y las placas.....	41
28 Recubrimiento de piso cerámica relativo a la cámara térmica y las placas: vista alzada.....	42
29 Placa cerámica.....	42
30 Análisis estructural FEA de la cámara térmica.....	43

	Pág.
31 Análisis térmico FEA de la cámara térmica en su exterior.....	44
32 Análisis térmico FEA de la cámara térmica en su interior.....	45
AF1 Constancia fase local, InnovaTecNM 2025.....	53
AF2 Constancia fase regional, InnovaTecNM 2025.....	54

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Dimensiones de la cámara térmica de hornos reportados en la literatura.....	28
2	Biblioteca de materiales de documentación de diseño y simulación en SolidWorks®.....	29
3	Propiedades de materiales para el análisis estructural FEA.....	34
4	Propiedades de materiales para el análisis térmico FEA.....	35
5	Condiciones de operación y parámetros térmicos.....	36
AT1	Listado de empresas o talleres con servicios de tratamiento térmico.....	51

## I. INTRODUCCIÓN

La gestión y aprovechamiento de los plásticos de desecho representa un desafío ambiental relevante debido a su elevada persistencia en el medio ambiente y a los impactos negativos asociados a su disposición final. En este contexto, el reciclaje de materiales plásticos mediante procesos mecánicos y termoquímicos se ha consolidado como una alternativa viable para su reincorporación a ciclos productivos. Sin embargo, la operación de tecnologías como extrusoras, trituradoras y reactores de pirólisis requiere el uso de maquinaria compuesta por diversos elementos metal-mecánicos sometidos a condiciones severas de operación. La limitada disponibilidad de servicios de tratamiento térmico especializados y los altos costos asociados a estos procesos en México evidencian un área de oportunidad tecnológica. Por ello, el desarrollo de soluciones propias para el tratamiento térmico de componentes metálicos resulta estratégico para mejorar su desempeño, durabilidad y viabilidad económica dentro del sector del reciclaje de plásticos.

### 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El aprovechamiento de los plásticos de desecho contribuye a mitigar la problemática asociada a su disposición final considerando que son productos que tienen una gran longevidad para degradarse y causan implicaciones ambientales como, por ejemplo, la afectación a las especies que se ven afectadas por la ingesta de botellas plásticas [1]. Ante este panorama, en México, el consumo nacional aparente de envases de polietileno de tereftalato (PET) asciende a aproximadamente 860 mil toneladas y en donde de este volumen, en 2024, se alcanzó una tasa de acopio del 64% de botellas de PET, de las cuales, el 89% del material recuperado se destinó a la fabricación de nuevos productos [2] mediante tecnologías de reciclaje. En este contexto, el reciclaje de plásticos mediante procesos como la extrusión, trituración o pirólisis han sido reportados ampliamente como alternativas viables para aprovechar nuevamente estos materiales [3]-[6]. No obstante, estos procesos requieren el uso de máquinas extrusoras, trituradoras y reactores de pirólisis, respectivamente. De manera general, este tipo de maquinaria integra diversos componentes metal-mecánicos para su operación, tales como engranes, ejes de transmisión de potencia, husillos de extrusión, cuchillas de corte y poleas de elevación, entre otros. En este sentido, en el trabajo de [7] se reportó una máquina extrusora que empleó una caja reductora compuesta de ejes y engranes como parte de su sistema de transmisión de potencia. En [8] se presentó una máquina trituradora provista de un molino de corte compuesto de ejes, engranes y cuchillas metálicas. El autor de [9] diseñó y manufacturó un reactor de pirólisis provisto de una estructura de soporte de un porta-reactor con capacidad de inclinación gracias a dos ejes de giro que soportan el peso total del sistema. En ninguno de los estudios anteriores se especificó el haber sometido a un tratamiento térmico a las piezas metálicas antes mencionadas, motivo por el cual la vida útil de dichos componentes se puede ver significativamente reducida al no estar sometidas dichas piezas a un tratamiento térmico orientados a mejorar sus propiedades de dureza y resistencia al desgaste por fricción, contacto, rotación y esfuerzos mecánicos.

Por otra parte, en México, en el 2024, se registraron poco más de 5.5 millones de establecimientos pertenecientes al sector privado y paraestatal [10]. A nivel nacional, se identificaron únicamente 1,019 empresas [11] dedicadas a recubrimientos y terminados metálicos dentro de las cuales se pueden citar a solo 23 empresas o talleres (ver Anexo 1) que se dedican a la prestación de servicios de tratamiento térmico de metales y productos metálicos. Lo anterior representa solo el 0.0005% del padrón total de establecimientos lo que evidencia un área de oportunidad para incursionar en el desarrollo de este tipo de tecnología e incrementar la oferta de estos servicios. Estos servicios, en el 2014, presentaron precios base promedio para procesos como temple, cementación y revenido, con un cargo mínimo de \$200.00 MXN y un costo aproximado de \$58.00 MXN por kilogramo procesado más impuestos [12]. Adicionalmente, se reportó un costo promedio por concepto de encendido de horno cercano a \$4,100.00 MXN sin considerar impuestos, gastos de envío ni tiempos asociados a la ejecución del trabajo [12]. Considerando el índice nacional de precios al consumidor y con base a un factor acumulado de inflación, para el 2025, estos precios oscilaron aproximadamente en un cargo mínimo de \$360.00 MXN y un costo aproximado de \$104.00 MXN por kilogramo procesado (sin considerar impuestos) y un costo por concepto de encendido de horno cercano a \$7,380.00 MXN más impuestos. En este contexto, un equipo (cámara) de tratamiento térmico puede tener un costo aproximado entre  $\pm$ \$490,000 MXN (med.  $6.8 \times 2.5 \times 3$  m) y  $\pm$ \$615,000 MXN (med.  $7.28 \times 3.3 \times 3.8$  m) [13], así como entre USD \$15,000 y \$50,000 para hornos industriales por lotes (según dimensiones) [14] y entre USD \$60,000 y +\$200,000 para unidades de vacío y atmosfera controlada [14].

Por lo que, resulta viable la implementación de un horno propio para tratamientos térmicos de piezas metálicas de prototipos empleados en el ámbito del reciclaje de plásticos ya que permitiría ampliar la vida útil de las piezas metálicas de los equipos (incrementar dureza y resistencia) y de reducir de manera significativa los costos de adquisición, operativos y los tiempos de respuesta asociados a este tipo de servicio. Por lo tanto, el presente estudio se plantea como un elemento potencialmente integrable a la cadena industrial metalúrgica, orientado a la realización de tratamientos térmicos especializados en piezas metálicas.

Por consiguiente, se contempla el desarrollo de un horno de tratamiento térmico para piezas metal-metálicas empleadas en la fabricación de máquinas y equipos utilizados en el reciclaje mecánico o químico de plásticos. Lo anterior considerando las siguientes etapas para su desarrollo: (1) diseño mecánico, (2) manufactura, (3) automatización y (4) validación experimental.

En este estudio se presentan los logros alcanzados de la etapa de diseño mecánico y estructural. El horno se definió bajo una configuración geométrica tipo caja con dimensiones suficientes para realizar el tratamiento térmico de piezas de hasta  $1 \times 0.5 \times 0.7$  m bajo temperaturas por encima de los 1000 °C.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo general

Desarrollar el diseño mecánico y estructural de un horno de tratamiento térmico a nivel prototipo, mediante el uso de software CAD 3D, con el fin de definir la configuración geométrica, dimensiones y disposición de sus componentes previo a su construcción.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Definir los requerimientos geométricos y funcionales del horno de tratamiento térmico a partir de su aplicación metal-mecánica a nivel prototipo.
- Modelar en SolidWorks® los componentes mecánicos y estructurales del horno, incluyendo la cámara térmica, la estructura de soporte y los elementos de acceso, conforme a los requerimientos establecidos.
- Generar los ensambles, vistas, cortes y planos técnicos necesarios que permitan la correcta interpretación del diseño y su posterior proceso de manufactura.

## 1.3 JUSTIFICACIÓN

El funcionamiento confiable de las máquinas empleadas en el reciclaje mecánico o químico de plásticos depende en gran medida de la integridad y desempeño de los componentes metal-mecánicos que las integran, tales como ejes, engranes, husillos y elementos de corte. Estos componentes están sometidos a esfuerzos mecánicos, fricción y condiciones térmicas que pueden reducir su vida útil si no se les aplican tratamientos térmicos orientados a mejorar propiedades como la dureza y la resistencia al desgaste. Sin embargo, diversos desarrollos tecnológicos reportados en la literatura no especifican la aplicación de tratamientos térmicos a dichos componentes, lo que sugiere una posible limitación en su durabilidad operativa. Esta situación se ve acentuada en el contexto nacional, donde la oferta de servicios especializados de tratamiento térmico es limitada y los costos asociados a su subcontratación y a la adquisición de hornos industriales comerciales resultan elevados.

En este contexto, el diseño y manufactura de un horno de tratamiento térmico hecho a la medida se plantea como una alternativa técnica y económicamente viable para el acondicionamiento de piezas metálicas utilizadas en la fabricación de prototipos destinados al reciclaje de plásticos. La validación técnica del prototipo mediante su puesta en operación sin carga permite caracterizar el comportamiento térmico del equipo, determinar el gradiente de temperatura y verificar su correcto funcionamiento bajo condiciones controladas.

Por lo tanto, el presente estudio se justifica como una contribución al desarrollo de infraestructura tecnológica propia para la aplicación de tratamientos térmicos, orientada a mejorar la vida útil de los componentes metálicos y a fortalecer la confiabilidad de los prototipos empleados en el ámbito del reciclaje de plásticos.

## 1.4 HIPÓTESIS

El diseño mecánico y estructural de un horno de tratamiento térmico desarrollado mediante software CAD 3D permitirá establecer una configuración geométrica y constructiva adecuada para su futura fabricación a nivel prototipo.

## 1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

- Únicamente se diseñará un solo tipo de modelo de horno de tratamiento térmico.
- Por cuestiones de capacidad computacional, un simple análisis estructural y/o térmico empleando el método de elementos finitos (FEA, en sus siglas en inglés) de la herramienta de SolidWorks® Simulation fue realizado.
- Esta fuera del alcance del presente estudio la construcción del horno diseñado.
- Por derechos de propiedad industrial y patentado, las dimensiones específicas del prototipo no son presentadas en el presente trabajo.

## 1.6 GENERALIDADES

La presente Tesis es resultado del proyecto con clave 21463.24-P del TecNM y constituye una extensión más amplia y metódica del proyecto de residencia profesional, el cual fue desarrollado de manera grupal.

En este contexto, se establecieron nuevas metas y objetivos con mayor pertinencia, a fin de conformar un proyecto integral de titulación mediante Tesis.

Este trabajo forma parte de un proyecto global orientado al diseño y construcción de un horno de tratamiento térmico, por lo que el estudio se llevó a cabo bajo una dinámica conjunta, atendiendo a los requerimientos, condiciones y características del proyecto proponente.

En consecuencia, los productos entregables de los participantes comparten las secciones básicas del documento de Tesis, diferenciándose únicamente en los resultados obtenidos en los distintos módulos de proceso.

## II. MARCO TEÓRICO

En esta sección se describen conceptos básicos sobre el tratamiento térmico y sus propiedades, así como el tipo de tecnología empleada para llevar a cabo estos procedimientos de calentamiento abarcando desde nociones de diseño y manufactura hasta tipos de hornos de tratamiento térmico y sus arquitecturas.

### 2.1 TRATAMIENTO TÉRMICO PARA COMPONENTES MECÁNICOS

El tratamiento térmico involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios estructurales en un material, los cuales modifican sus propiedades mecánicas, se aplican principalmente a las aleaciones ferrosas, tales como los aceros, aunque también se aplican a aleaciones no ferrosas [15]. En [16] se define al tratamiento térmico como cualquier aplicación de una alta temperatura durante un tiempo determinado según el material a tratar hasta lograr obtener las propiedades requeridas como por ejemplo reducir las tensiones o provocar cambios en la composición química de la superficie de la aleación, entre otros. En este sentido, en [17] el tratamiento térmico se define como un procedimiento que mejora las propiedades de una pieza metálica de trabajo e involucra varios procesos de calentamiento y enfriamiento para efectuar cambios microestructurales en un material provocando un cambio en sus propiedades mecánicas.

Dentro de los tratamientos térmicos comunes se reconoce la austenización, temple y revenido, recocido, endurecimiento por precipitación y endurecimiento superficial (carburización, nitruración y carbonitruración) [17].

Los tratamientos térmicos se llevan a cabo en hornos especializados, donde las piezas metálicas son sometidas a temperaturas elevadas con y sin atmósfera controlada para modificar su dureza superficial, la ductilidad, la resistencia al desgaste o incluso el acabado superficial. Esta técnica de tratamiento térmico finaliza generalmente con un proceso de temple en donde se realiza un enfriamiento controlado hasta que las piezas alcanzan una temperatura ambiente. En este panorama, el objetivo de un tratamiento térmico es obtener componentes con propiedades mecánicas distintas a las del material en su estado inicial. En términos generales, los tratamientos térmicos pueden clasificarse en dos grandes grupos. Por un lado, se encuentran los tratamientos aplicados al núcleo del material en piezas semiacabadas, como el recocido, los cuales se realizan sobre productos metálicos (, tales (chapas, bobinas o tubos) conformados en frío. Lo anterior para incrementar la ductilidad del material. Por otro lado, existen los tratamientos orientados al endurecimiento superficial (cementación, temple, revenido y nitruración). Estos se aplican sobre piezas ya terminadas para mejorar sus propiedades superficiales y mecánicas (dureza, resistencia al desgaste y a la corrosión) [18].

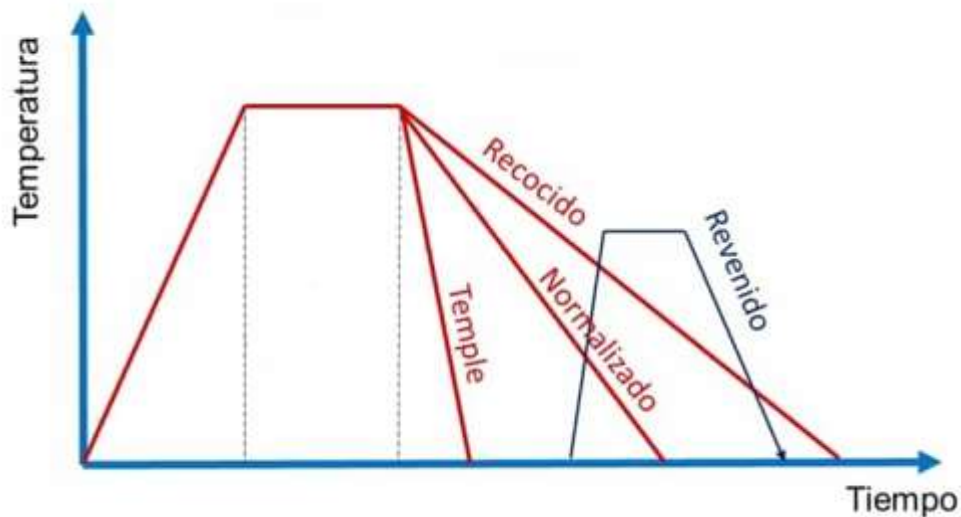
Existen diferentes tipos de tratamientos térmicos, algunos de los cuales se detallan a continuación [19]:

- (1) Temple. - es un proceso que implica calentar el material a una temperatura elevada y luego enfriarlo rápidamente. Esto se hace sumergiendo el material en un medio de enfriamiento, como aceite o agua. El

temple mejora la dureza y resistencia a la tracción del material, haciéndolo más adecuado para aplicaciones de alta resistencia y rigidez;

- (2) Recocido. - es un proceso que implica calentar el material a una temperatura elevada y luego enfriarlo lentamente. El recocido reduce la dureza y la fragilidad del material y lo hace más maleable y dúctil. Es útil para materiales que se deforman fácilmente, como aluminio y cobre;
- (3) Revenido. - es un proceso que implica calentar el material templado a una temperatura moderada y luego enfriarlo lentamente. El revenido aumenta la tenacidad y la resistencia a la fatiga del material, haciéndolo menos propenso a fracturas bajo estrés. También reduce la fragilidad del material y aumenta su ductilidad.
- (4) Normalizado. - es un proceso que implica calentar el material a una temperatura elevada y luego enfriarlo en el aire. El normalizado se utiliza para mejorar la uniformidad y la calidad del material, reducir las tensiones internas y mejorar la resistencia y la ductilidad del material.

En la Figura 1, se observan los principales tratamientos térmicos a los que se someten comúnmente los aceros en función de la temperatura y el tiempo de tratamiento según el objetivo que se desea conseguir después del proceso. Por ejemplo, para lograr el efecto del temple, después del calentamiento, el enfriamiento debe ser rápido y controlado mediante la inmersión de la pieza en un fluido de enfriamiento (comúnmente empleando agua o aceite), ver Figura 2.



*Figura 1. Tipos de tratamientos térmicos [19].*



*Figura 2. Tratamiento térmico de temple [19].*

## 2.2 PROPIEDADES DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

El tratamiento térmico es un proceso controlado de calentamiento y enfriamiento que se utiliza para modificar la microestructura de materiales, como metales y aleaciones, para aportar propiedades beneficiosas como una mayor resistencia, ductilidad o resistencia al desgaste sin comprometer la integridad dimensional de un componente sometido a este tipo de tratamiento [20]. La dureza es una magnitud específica de la materia que caracteriza la deformación local, concentrada en un pequeño volumen de su superficie exterior de un material [21]. También se puede definir como la resistencia que presenta un material a ser penetrado o rayado, por tal motivo existen varios métodos para medir la dureza de los materiales, esto depende de las características físicas del material, algunos de estos métodos son: Brinell, Vickers o Rockwell y Knoop [22]. Uno de los tratamientos térmicos más utilizados para aumentar la dureza es el temple. Durante el proceso de temple el material se enfría rápidamente en agua, aceite o aire para obtener ciertas propiedades del material, especialmente la dureza. En las aleaciones ferrosas, el temple se usa más comúnmente para endurecer el acero mediante la introducción de martensita [23]. La variación de la dureza en los aceros es considerable y depende de múltiples variables: la composición química del acero, las temperaturas a las que se somete durante el tratamiento, el tiempo que permanece a esas temperaturas, y el tipo de medio que se utiliza para enfriarlo. Por ejemplo, al compararse un acero que ha sido templado con uno de composición química idéntica pero que ha sido recocido, el primero presentará valores de dureza sustancialmente más elevados; esto se explica por la formación de estructuras martensíticas que se generan durante el enfriamiento acelerado y que son intrínsecamente más duras. Esta relación directa entre tratamiento térmico y dureza hace que la medición de dureza sea una herramienta esencial en el control de calidad de procesos industriales [24]. También se puede definir como la resistencia que presenta un material a ser penetrado o rayado, por tal motivo existen varios métodos para medir la dureza de los materiales, esto depende de las características físicas del material, algunos de

estos métodos son: Brinell, Vickers o Rockwell y Knoop [22]. La selección del método apropiado depende del tipo de material, la propiedad específica que se desea medir, la geometría y tamaño de la muestra, los requisitos de carga, la disponibilidad del equipo y la exactitud requerida en el ensayo. En la industria moderna, se han desarrollado equipos portátiles como el durómetro Leeb (ver Figura 3) que permiten realizar inspecciones de dureza directamente en campo, facilitando el control de calidad de componentes de acero en sitio sin necesidad de transportar las piezas a laboratorios especializados [24].



*Figura 3. Operario inspeccionando la dureza del material con un durómetro Leeb portátil [24].*

## 2.2.1 Métodos de ensayo de dureza para aceros

### a. Ensayo Brinell (HB)

La técnica de Brinell se fundamenta en aplicar presión sobre la superficie del acero utilizando una esfera fabricada de acero endurecido o carburo de tungsteno, para posteriormente determinar el valor de dureza a través de la medición del diámetro de la marca circular que queda impresa [25]. Las esferas penetradoras están disponibles en diversos tamaños –específicamente 10, 5, 2.5, 1.125 y 0.625 mm de diámetro– mientras que las fuerzas aplicadas oscilan comúnmente entre 500 y 3000 kilogramos-fuerza, seleccionándose según las características del acero que se está evaluando. En el caso particular de materiales ferrosos como los aceros con bajo contenido de carbono o los aceros de aleación baja, la práctica recomendada consiste en emplear una carga de 3000 kg junto con un penetrador esférico de 10 mm. El valor numérico de dureza Brinell se obtiene estableciendo la proporción matemática entre la fuerza que se aplicó y el área superficial de la impresión esférica que dejó el penetrador [26]. Esta metodología resulta especialmente valiosa cuando se trabaja con aceros cuyas superficies presentan rugosidad considerable, o cuando se evalúan componentes que han sido fabricados mediante fundición o forjado. El método Brinell es

altamente recomendado para metales y aleaciones cuando se requiere medir macrodureza, dureza de indentación, o cuando se trabaja con muestras planas y grandes, así como para ensayos que demandan exactitud y precisión moderadas. La impresión de dimensiones más grandes permite obtener un valor que representa adecuadamente las propiedades del material incluso si existe variabilidad en su microestructura. No obstante, este método encuentra sus límites cuando se aplica a aceros con durezas extremadamente elevadas (por encima de 450-500 HB), ya que existe el riesgo de que el penetrador esférico sufra deformaciones, además de no ser recomendado para cargas bajas [24].

#### **b. Ensayo Vickers (HV)**

El método Vickers se caracteriza por utilizar un penetrador con forma de pirámide elaborado en diamante, cuya base es cuadrada y cuyos ángulos entre caras opuestas miden  $136^\circ$ , característica que garantiza que las impresiones mantengan su similitud geométrica sin importar su tamaño. La determinación de la dureza mediante este sistema se logra calculando la relación entre la fuerza ejercida y el área de la marca permanente dejada, la cual se obtiene midiendo las diagonales de la impresión cuadrangular generada por el penetrador [26]. Las ventajas que ofrece este método para el estudio de aceros son significativas: Vickers es altamente recomendado para metales y aleaciones, cerámicas y vidrios, así como para películas finas y recubrimientos; además es el método ideal cuando se requiere medir macrodureza, microdureza, o cuando se trabaja con muestras planas y grandes, así como con muestras pequeñas o finas [24]. Su versatilidad permite trabajar tanto con materiales de dureza extrema como con aquellos relativamente blandos, puede aplicarse sobre superficies que presentan curvatura ya sea cilíndrica o esférica, posibilita el ensayo de materiales con espesores sumamente reducidos (llegando hasta 0.2 mm), y proporciona la mayor sensibilidad entre todos los métodos de medición de dureza. Para aceros que han sido sometidos a tratamientos térmicos, particularmente aquellos donde se ha endurecido solamente la superficie o donde existen variaciones graduales de dureza, la técnica Vickers representa la opción más apropiada, ya que permite trazar perfiles de microdureza atravesando la sección del material [26]. Vickers es recomendado tanto para cargas elevadas en materiales más duros como para cargas bajas, además de proporcionar alta exactitud y precisión en los resultados [24].

#### **c. Ensayo Rockwell (HR)**

Entre todos los métodos disponibles para evaluar la dureza de aceros, el ensayo Rockwell es probablemente el más difundido a nivel mundial, lo cual se atribuye a múltiples factores: su procedimiento simple, la velocidad con la que se completa cada ensayo (requiriendo menos de 30 segundos), y la facilidad con la que puede ser operado [24]. A diferencia de las técnicas Brinell y Vickers, las cuales requieren análisis visual y medición dimensional de la marca dejada, el método Rockwell cuantifica la dureza mediante la medición de cuánto penetra el indentador en el material, siguiendo un procedimiento específico de tres pasos como se ilustra en la Figura 4 [25]. El valor de dureza puede leerse inmediatamente en el instrumento de medición, eliminando la necesidad de realizar cálculos

posteriores o análisis mediante sistemas ópticos. Como se detalla en la Figura 4, el ensayo Rockwell se ejecuta en tres etapas claramente definidas: en el primer paso (1.Step) se aplica una pre-carga mediante el indentador sobre la superficie del material; en el segundo paso (2.Step) se aplica la carga total, que es la combinación de la pre-carga más una carga adicional, alcanzándose la profundidad máxima de indentación; finalmente, en el tercer paso (3.Step) se retira la carga adicional manteniendo únicamente la pre-carga, y se mide el resultado de la profundidad de indentación permanente que determina el valor de dureza [25]. Esta profundidad de indentación residual ( $h$ ) se mide desde la posición inicial (0) hasta la profundidad final después de retirar la carga adicional, como se ilustra en el diagrama de la Figura 4. El sistema Rockwell incorpora múltiples escalas diseñadas específicamente para diferentes tipos de aceros. Cuando se requiere evaluar aceros que han sido templados y poseen alta resistencia mecánica, se recurre a la escala C (HRC), la cual opera con un penetrador cónico de diamante que tiene un extremo esférico y aplica una carga de 150 kilogramos-fuerza. Esta escala encuentra aplicación extensiva en aceros que han experimentado endurecimiento por temple con el objetivo de incrementar su resistencia, incluyendo aceros para herramientas, componentes de máquinas, ejes de transmisión, rodamientos y componentes de sujeción. Por otro lado, cuando se trabaja con aceros de dureza intermedia o baja, como los aceros al carbono en condición de recocido o normalizado, se emplea la escala B (HRB), que funciona con una esfera de acero endurecido de 1/16 de pulgada y una carga de 100 kilogramos-fuerza [26]. El método Rockwell es altamente recomendado para metales y aleaciones cuando se necesita medir macrodureza y dureza de indentación, especialmente en muestras planas y grandes, así como en formas curvas o irregulares [24]. Los beneficios principales que ofrece este método para la caracterización de aceros comprenden: la utilización de una carga preliminar que condiciona la superficie y reduce la influencia de irregularidades superficiales (como se observa en el primer paso de la Figura 4), la obtención inmediata del valor de dureza sin procedimientos adicionales, la rapidez del ensayo completo lo cual resulta crucial en ambientes de control de calidad donde se procesan grandes volúmenes, y la posibilidad de que personal con entrenamiento básico pueda realizar las mediciones con resultados confiables [26], [24]. Además, el equipo Rockwell es comúnmente disponible y proporciona exactitud y precisión moderadas a altas [24].

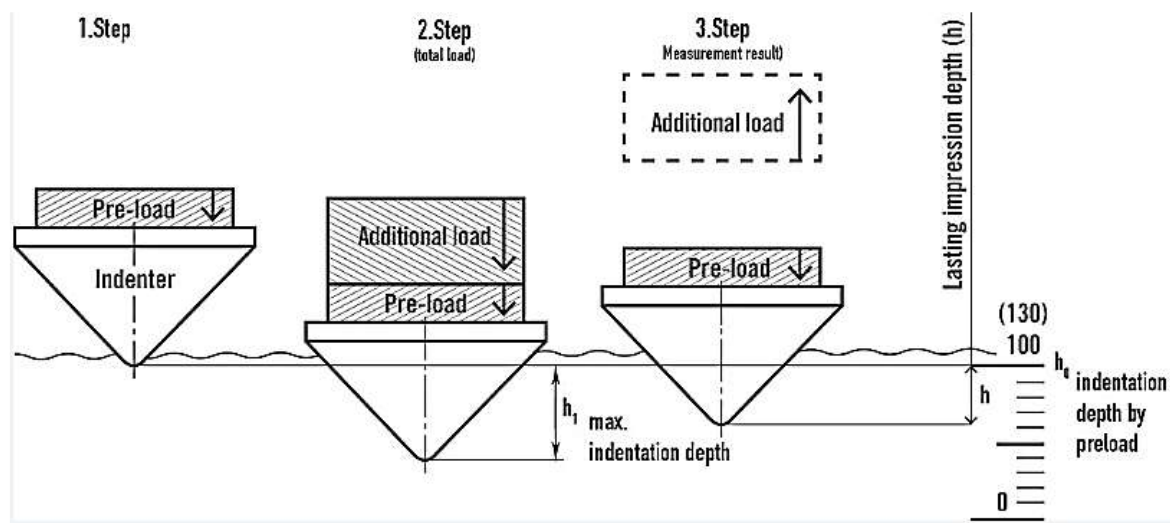
#### **d. Ensayo Knoop (HK)**

El método Knoop pertenece a las técnicas de microindentación y se basa en un penetrador piramidal de diamante que presenta una geometría alargada con dos extensiones pronunciadas, lo cual resulta en una impresión que penetra relativamente poco en profundidad (aproximadamente una trigésima parte de su diagonal más larga) [26]. Esta característica lo hace especialmente adecuado para aceros donde se han desarrollado capas superficiales endurecidas, cuando existen recubrimientos de espesor limitado, o cuando se necesita conocer la dureza en zonas muy específicas del material. El ensayo Knoop es altamente recomendado para cerámicas y vidrios, así como para películas finas y recubrimientos, siendo el método ideal para medir microdureza en muestras pequeñas o finas y formas curvas o irregulares [24]. En el contexto de los aceros, el ensayo Knoop resulta invaluable para caracterizar superficies que han sido sometidas a procesos de nitruración, cementación o carburización, situaciones donde es

necesario establecer cómo varía la dureza a profundidades muy pequeñas sin que la marca del penetrador perforo toda la capa que se ha endurecido. La configuración alargada característica del penetrador Knoop facilita realizar mediciones muy cercanas a los bordes de las probetas o entre rasgos microestructurales particulares. Knoop es recomendado para cargas bajas y proporciona alta exactitud y precisión en los resultados, aunque requiere equipo especializado que no está comúnmente disponible [24].

**e. Ensayo Leeb (Método de rebote)**

El método Leeb representa una alternativa moderna y portátil para la medición de dureza en aceros, como se ilustra en la Figura 3 donde un operario realiza la inspección de dureza directamente sobre el material utilizando un durómetro Leeb portátil. Este método se basa en el principio de rebote, donde un cuerpo de impacto con punta de carburo de tungsteno es lanzado contra la superficie del material mediante un resorte. La dureza se determina midiendo la velocidad del cuerpo de impacto antes y después del contacto con el material: en materiales más duros, el rebote es mayor y por tanto la pérdida de velocidad es menor. Las principales ventajas del método Leeb para aplicaciones en aceros incluyen su portabilidad, permitiendo realizar mediciones en campo sobre componentes de gran tamaño o estructuras que no pueden ser trasladadas a un laboratorio, como se observa en la Figura 3. Este método es altamente recomendado para metales y aleaciones cuando se requiere medir dureza de rebote, especialmente en muestras planas y grandes, formas curvas o irregulares, y cuando se necesitan realizar pruebas de campo utilizando equipos portátiles. El durómetro Leeb es comúnmente disponible en la industria y proporciona exactitud y precisión moderadas, siendo ideal para inspecciones rápidas de control de calidad en sitio. Sin embargo, este método no es recomendado para muestras pequeñas o finas, ni para mediciones de microdureza o dureza de indentación [24].



**Figura 4.** Procedimiento de tres pasos del ensayo de dureza Rockwell, mostrando la aplicación de pre-carga, carga total y medición de la profundidad de indentación permanente [25].

### 2.2.2 Selección del método de ensayo para aceros

La elección del método más conveniente para determinar la dureza de aceros requiere considerar diversos aspectos: el tipo de material (metales y aleaciones versus cerámicas o recubrimientos), el intervalo de dureza que se anticipa encontrar, qué tan grueso es el material, el estado de la superficie, si es necesario que la pieza permanezca útil después del ensayo, la ubicación donde se realizará el ensayo (laboratorio versus campo), la disponibilidad del equipo, y qué tan precisa debe ser la medición [24]. Cuando se trata de aceros templados de alta dureza en un entorno de laboratorio, generalmente el método Rockwell C representa la alternativa óptima por su combinación de velocidad, exactitud y el procedimiento sistemático de tres pasos que garantiza resultados reproducibles [25]. Si se trabaja con aceros heterogéneos o de gran espesor, el método Brinell ofrece un valor más representativo del material en su conjunto. Para situaciones donde se requiere caracterizar únicamente las capas superficiales o cuando se necesitan mediciones con alta precisión en regiones específicas, los métodos Vickers o Knoop constituyen las opciones preferibles, siendo Vickers más versátil para aplicaciones generales y Knoop más especializado para recubrimientos y capas delgadas. Cuando las condiciones requieren realizar inspecciones de dureza directamente en campo, sobre componentes instalados o estructuras de gran tamaño, el método Leeb con equipos portátiles (como se muestra en la Figura 3) representa la solución más práctica, aunque con menor precisión que los métodos de laboratorio [24], [25]. La versatilidad de los métodos modernos de medición de dureza permite a los ingenieros y técnicos seleccionar la técnica más apropiada según las necesidades específicas de cada aplicación industrial.

### 2.2.3 Resistencia mecánica

La resistencia mecánica es una propiedad esencial en el estudio y la caracterización de los aceros, ya que describe la capacidad del material para soportar esfuerzos y cargas aplicadas sin que se produzcan fallas estructurales ni deformaciones permanentes excesivas. Desde el punto de vista de la ingeniería de materiales, esta propiedad es determinante para seleccionar un acero adecuado para una aplicación específica, pues define los rangos seguros de operación en los que el componente puede desempeñar su función sin comprometer su integridad. Cabe destacar que la resistencia mecánica no corresponde a un único parámetro, sino a un conjunto de propiedades relacionadas que explican el comportamiento del acero frente a distintos tipos de sollicitación mecánica, condiciones térmicas y velocidades de deformación. Estas propiedades están estrechamente ligadas a la composición química del material, su microestructura y los procesos de fabricación empleados, siendo los tratamientos térmicos uno de los factores con mayor influencia en su modificación. Durante los tratamientos térmicos, el acero experimenta transformaciones de fase que alteran significativamente sus propiedades mecánicas. Estas transformaciones permiten adaptar el material a requerimientos específicos, desde aplicaciones estructurales que demandan elevada ductilidad hasta herramientas de corte que requieren alta dureza y resistencia al desgaste [15].

## 2.2.4 Tipos de resistencia mecánica en los aceros

### a. Resistencia a la tracción ( $\sigma_u$ )

La resistencia a la tracción, también conocida como resistencia última, corresponde al valor máximo de esfuerzo que un material puede soportar bajo una carga de tracción antes de fracturarse. Este parámetro se obtiene mediante el ensayo de tracción estandarizado, en el cual una probeta es sometida a una carga axial creciente mientras se registra su deformación, generando la curva esfuerzo–deformación característica del material. A partir de dicha curva se determinan diversas propiedades mecánicas relevantes. En los aceros, la resistencia a la tracción depende de manera significativa tanto de la composición química como del tratamiento térmico aplicado. Por ejemplo, aceros al carbono en condición recocida suelen presentar valores de resistencia a la tracción del orden de 400 a 500 MPa, mientras que los mismos aceros, tras un proceso de temple y revenido, pueden superar los 1500 MPa. Este incremento se debe a los cambios microestructurales inducidos, particularmente a la formación de martensita durante el temple, seguida de un ajuste controlado de propiedades mediante el revenido [15]. Además de indicar la capacidad máxima de carga del material, la resistencia a la tracción permite analizar el comportamiento del acero previo a la fractura. En materiales dúctiles se observa la formación de una zona de estricción antes de la rotura, mientras que los aceros frágiles pueden fracturarse de manera súbita, sin deformación apreciable, especialmente cuando han sido templados sin un revenido adecuado.

### b. Límite elástico o resistencia a la fluencia ( $\sigma_y$ )

El límite elástico, también denominado resistencia a la fluencia, representa el esfuerzo a partir del cual el acero deja de comportarse de manera elástica y comienza a deformarse plásticamente. Este parámetro es crítico en el diseño de componentes mecánicos, ya que establece el esfuerzo máximo permisible para asegurar que el material recupere su forma original una vez retirada la carga. En muchos aceros al carbono de bajo y medio contenido de carbono se presenta un fenómeno conocido como punto de cedencia definido, caracterizado por la aparición de un límite elástico superior seguido de una caída hacia un límite elástico inferior. Posteriormente, el material fluye plásticamente a esfuerzo casi constante antes de iniciar el endurecimiento por deformación. Este comportamiento está relacionado con la interacción entre dislocaciones y átomos intersticiales de carbono y nitrógeno en la red cristalina. El tratamiento térmico influye de forma decisiva en el valor del límite elástico. El temple provoca un aumento notable de esta propiedad debido a la formación de martensita, una estructura que dificulta el movimiento de dislocaciones. En contraste, el revenido permite reducir el límite elástico de manera controlada, mejorando simultáneamente la tenacidad y adaptando las propiedades del acero a los requerimientos del servicio [15].

### c. Tenacidad

La tenacidad se define como la capacidad del acero para absorber energía durante la deformación plástica antes de fracturarse, y está estrechamente relacionada con su resistencia a la propagación de grietas y a la fractura bajo

cargas dinámicas o de impacto. A diferencia de otras propiedades mecánicas, la tenacidad considera la energía total absorbida hasta la falla, lo que la convierte en un parámetro esencial en aplicaciones sometidas a condiciones de servicio severas o cargas repentinas. Esta propiedad se evalúa comúnmente mediante ensayos de impacto, como Charpy o Izod, que miden la energía absorbida por una probeta entallada durante la fractura, así como mediante ensayos de mecánica de fractura para determinar la tenacidad a la fractura ( $K_{IC}$ ). Muchos aceros presentan un comportamiento de transición dúctil-frágil al variar la temperatura, lo cual es especialmente relevante en aplicaciones a bajas temperaturas. Los tratamientos térmicos influyen de manera significativa en la tenacidad. Los aceros templados sin revenido suelen mostrar alta resistencia, pero baja tenacidad, siendo propensos a fracturas frágiles. El revenido, al inducir la precipitación de carburos finos y reducir las tensiones internas, incrementa considerablemente la tenacidad, aunque con una disminución moderada de la resistencia mecánica [15].

#### **d. Ductilidad**

La ductilidad expresa la capacidad del acero para deformarse plásticamente en gran magnitud antes de fracturarse. Esta propiedad es especialmente importante en procesos de conformado mecánico, como laminación, forjado o trefilado, donde el material debe soportar grandes deformaciones sin fallar. Asimismo, la ductilidad proporciona un margen de seguridad en estructuras, permitiendo deformaciones visibles que advierten sobre posibles sobrecargas. La ductilidad se cuantifica habitualmente mediante el porcentaje de alargamiento a la rotura y la reducción de área obtenidos en el ensayo de tracción. Aceros de bajo contenido de carbono en condición recocida pueden alcanzar alargamientos superiores al 30%, mientras que aceros con alto contenido de carbono o fuertemente endurecidos pueden presentar valores inferiores al 5%, evidenciando un comportamiento frágil. El tratamiento térmico modifica de forma considerable la ductilidad. El recocido favorece la formación de una microestructura de ferrita y perlita con granos relativamente grandes, lo que maximiza la ductilidad. En contraste, el temple genera martensita, una fase dura pero frágil, con ductilidad limitada. El normalizado ofrece un compromiso entre resistencia y ductilidad, siendo adecuado para múltiples aplicaciones industriales [15].

#### **e. Efecto del tratamiento térmico sobre la resistencia mecánica**

El temple es uno de los tratamientos térmicos más empleados para incrementar la dureza y la resistencia mecánica del acero. Este proceso consiste en enfriar rápidamente el material desde la temperatura de austenización mediante medios como agua, aceite o aire, con el objetivo de obtener una microestructura endurecida, principalmente martensítica [23]. La relación entre los tratamientos térmicos y la resistencia mecánica del acero se fundamenta en las transformaciones de fase inducidas durante los ciclos térmicos. El enfriamiento rápido del temple impide la difusión del carbono y evita la formación de fases de equilibrio, promoviendo la transformación directa de austenita a martensita. Esta estructura sobresaturada presenta alta densidad de dislocaciones y tensiones internas, lo que se traduce en elevados valores de dureza y resistencia, aunque con una reducción significativa de la tenacidad y la ductilidad [15]. El revenido posterior al temple permite ajustar las propiedades mecánicas del acero mediante la

reducción de tensiones internas y la precipitación controlada de carburos. A bajas temperaturas de revenido se conserva alta resistencia con ligeras mejoras en tenacidad; a temperaturas intermedias se obtiene un equilibrio óptimo entre resistencia, dureza y ductilidad; mientras que a temperaturas elevadas se prioriza la tenacidad, reduciendo la resistencia. Esta capacidad de ajuste hace que los tratamientos de temple y revenido sean herramientas clave para adaptar el acero a una amplia variedad de aplicaciones industriales.

## 2.3 HORNOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Los hornos de tratamiento térmico son equipos en los que se realizan tratamientos de metales a altas temperaturas bajo una atmósfera específica. Cada tipo de tratamiento térmico industrial se realiza en un tipo de horno en función de [27]:

- (a) el proceso;
- (b) el tipo de atmósfera (neutra, no descarburante, reactiva enriquecida con carbono o nitrógeno o mezcla de ambos);
- (c) parámetros inherentes al tratamiento: velocidad de calentamiento, temperatura de mantenimiento, tipo de carga de la pieza, etc;
- (d) los diferentes tipos de aleaciones y el tamaño de las piezas a procesar (pequeñas, grandes, para campos industriales específicos como la aeronáutica o la automoción) y
- (e) la uniformidad de las propiedades mecánicas requeridas para la pieza final (por ejemplo, un horno de cementación atmosférica puede dar a la pieza final una dureza menos homogénea que un proceso de cementación en un horno de vacío).

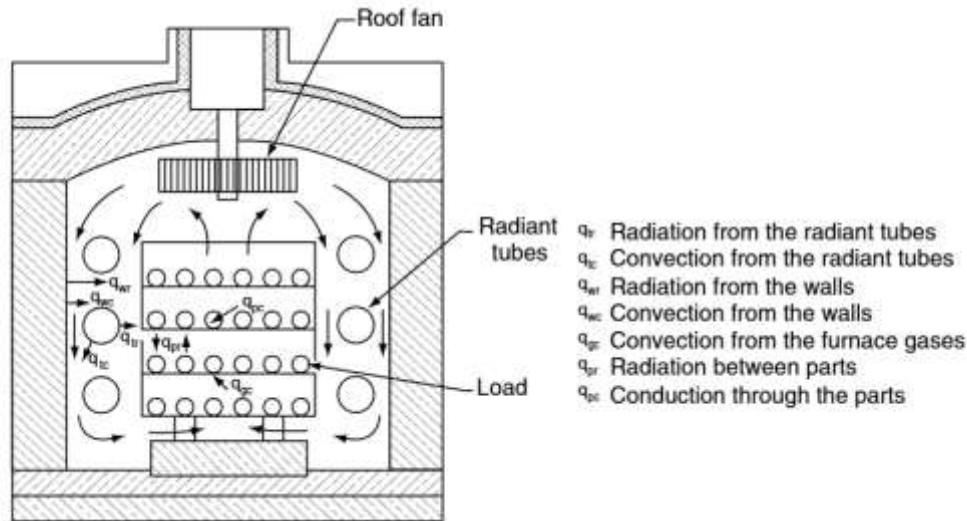
Los tratamientos térmicos aplicados a los metales tienen innumerables funciones, características y usos, por ello cada horno industrial tiene cualidades propias, que transmiten a los metales o piezas con los que trabajan; en el mercado podemos encontrar hornos para el trabajo con polímeros; los tratamientos térmicos modifican la estructura cristalina de los aceros sin alterar su composición química, por esta razón es de gran importancia elegir los hornos más adecuados para utilizarse en las diferentes actividades industriales, con el fin de obtener aquellos que permitan trabajar de forma adecuada, alcanzar los objetivos en menos tiempo, optimizar los recursos, obtener resultados de alta calidad y reducir los costes económicos y operativos [28].

### 2.3.1 Clasificación de los hornos de tratamiento térmico

Los hornos de tratamiento térmico constituyen equipos fundamentales dentro de la industria metalmeccánica, ya que permiten modificar de manera controlada la microestructura y, en consecuencia, las propiedades mecánicas de los metales. Debido a la diversidad de procesos térmicos y a los distintos requerimientos productivos, estos hornos pueden clasificarse atendiendo a varios criterios, entre los que destacan el método de calentamiento, el tipo de atmósfera de trabajo y las condiciones operativas del proceso. Desde el punto de vista del método de calentamiento, se distinguen principalmente los hornos de resistencia eléctrica, los hornos de inducción, los hornos de gas y los

hornos de baño de sales. Los hornos de resistencia eléctrica son ampliamente empleados en aplicaciones industriales y de laboratorio debido a la facilidad de control de la temperatura, la uniformidad del calentamiento y la limpieza del proceso, al no generar productos de combustión. Por su parte, los hornos de inducción permiten un calentamiento rápido y localizado, siendo especialmente adecuados para procesos que requieren altas tasas de calentamiento y una elevada eficiencia energética. Los hornos de gas, que emplean combustibles como gas natural o gas licuado, ofrecen ventajas importantes en términos de costos operativos cuando se trabaja con grandes volúmenes de producción o piezas de gran tamaño. No obstante, su control de temperatura suele ser menos preciso que el de los hornos eléctricos, lo que exige sistemas de control más robustos. Finalmente, los hornos de baño de sales utilizan sales fundidas como medio de transferencia de calor, proporcionando una excelente uniformidad térmica y una alta velocidad de calentamiento, aunque presentan mayores riesgos operativos y ambientales asociados al manejo de las sales [29].

Otra clasificación relevante se basa en la atmósfera de trabajo dentro del horno. En este sentido, se identifican los hornos de atmósfera oxidante, los hornos de atmósfera controlada y los hornos al vacío. Los hornos de atmósfera oxidante operan en presencia de aire y se emplean principalmente en procesos donde la oxidación superficial no representa una limitación crítica. En contraste, los hornos de atmósfera controlada utilizan mezclas específicas de gases, como nitrógeno, hidrógeno, monóxido de carbono o combinaciones de estos, con el objetivo de evitar fenómenos indeseables como la oxidación y la descarburación de las piezas tratadas. Estos hornos son ampliamente utilizados en la industria metalúrgica debido a su capacidad para proteger la superficie del material y garantizar acabados superficiales de alta calidad, lo cual resulta esencial en componentes que requieren tolerancias dimensionales estrictas y propiedades mecánicas homogéneas. En la Figura 5, se muestra un ejemplo de un horno industrial de tratamiento térmico con atmósfera controlada, en el que se aprecia la disposición general del sistema de calentamiento y control de gases. Los hornos al vacío representan una alternativa tecnológica avanzada, ya que eliminan prácticamente por completo la presencia de gases en el interior de la cámara de calentamiento. Esta condición permite evitar reacciones químicas no deseadas y obtener una elevada limpieza superficial, además de un control muy preciso de la temperatura. Debido a estas características, los hornos de vacío son especialmente adecuados para el tratamiento de aceros de alta aleación, superaleaciones y componentes de alta precisión utilizados en sectores como el aeroespacial, médico y de herramientas de corte [30].



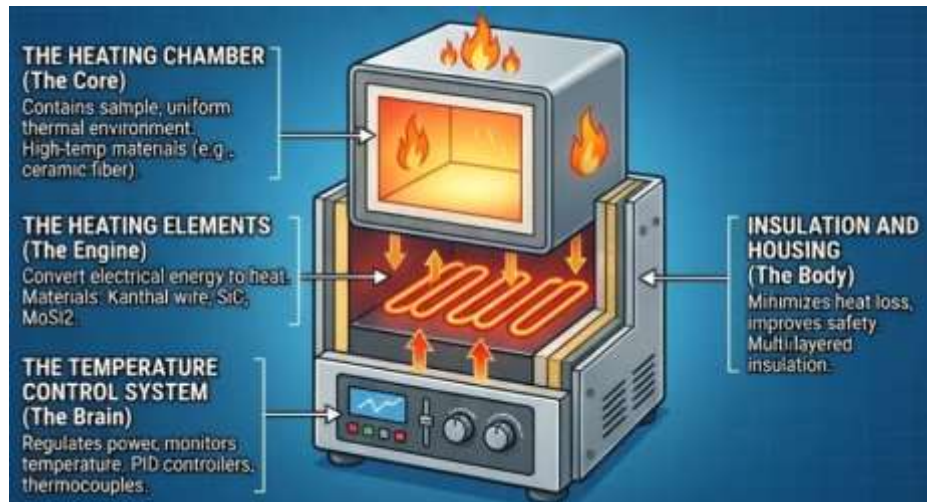
*Figura 5. Horno de tratamiento térmico con atmósfera controlada [29].*

### 2.3.2 Componentes principales de los hornos

Los hornos de tratamiento térmico están integrados por diversos componentes que trabajan de manera conjunta para asegurar la correcta ejecución del proceso [31]:

- Entre los elementos más importantes se encuentra la cámara de calentamiento, la cual constituye el espacio donde se colocan las piezas a tratar y está diseñada para soportar altas temperaturas de operación. Asimismo, el sistema de calentamiento puede estar conformado por elementos resistivos eléctricos, quemadores de gas o inductores, dependiendo del tipo de horno y del método de calentamiento empleado.
- Otro componente esencial es el sistema de control de temperatura, que generalmente incluye termopares, sensores y controladores electrónicos. Este sistema permite regular y monitorear con precisión la temperatura del proceso, garantizando la repetibilidad y la calidad del tratamiento térmico.
- Los hornos industriales modernos incorporan controladores programables capaces de ejecutar ciclos térmicos complejos con múltiples etapas de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento, lo que facilita la trazabilidad del proceso y el cumplimiento de normas de calidad. Adicionalmente, los hornos cuentan con un sistema de control de atmósfera encargado de la generación, suministro y regulación de los gases protectores o reactivos. Este sistema es determinante para prevenir defectos superficiales y asegurar que las propiedades finales del material cumplan con las especificaciones requeridas.
- El sistema de enfriamiento o temple, que puede emplear medios como agua, aceite, polímeros o gas, también forma parte integral del horno o de su línea de proceso. Finalmente, el aislamiento térmico, compuesto por materiales refractarios y fibras cerámicas, tiene la función de minimizar las pérdidas de calor y mejorar la eficiencia energética del equipo.

En la Figura 6, se presenta un diagrama de los componentes principales de un horno de laboratorio y en donde se identifican las partes convencionales de un horno previamente descritas. Es de resaltar que un horno de tratamiento térmico comparte los mismos componentes que los diagramas presentados.



*Figura 6. Diagrama esquemático de los componentes principales de un horno de tratamiento térmico [31].*

### 2.3.3 Eficiencia energética y consideraciones operativas

La eficiencia energética constituye un aspecto crítico en la operación de los hornos de tratamiento térmico, dado que estos equipos representan una proporción significativa del consumo energético total en la industria metalúrgica. Un uso ineficiente de la energía no solo incrementa los costos de producción, sino que también tiene un impacto directo en el medio ambiente debido al aumento de emisiones asociadas a la generación de energía. Por esta razón, el diseño y la operación de hornos modernos están cada vez más orientados hacia la optimización energética y la sostenibilidad del proceso. Entre las principales estrategias para mejorar la eficiencia energética se encuentra el empleo de materiales aislantes avanzados, como fibras cerámicas de baja conductividad térmica y refractarios de alta eficiencia, que permiten reducir significativamente las pérdidas de calor a través de las paredes del horno. Asimismo, la optimización del diseño de la cámara de calentamiento, incluyendo la distribución uniforme del calor y la reducción de fugas térmicas, contribuye a mejorar el rendimiento global del sistema. Otra estrategia ampliamente utilizada es la recuperación de calor de los gases de escape, especialmente en hornos de gas. Mediante el uso de intercambiadores de calor o sistemas regenerativos, parte de la energía térmica residual puede aprovecharse para precalentar el aire de combustión o incluso las propias piezas antes de su ingreso al horno. Gracias a estas tecnologías, los hornos industriales modernos pueden alcanzar eficiencias térmicas del orden del 70 al 80%, e incluso superiores en instalaciones de alta tecnología [29]. El control preciso de los ciclos térmicos también desempeña un papel fundamental en la eficiencia energética. La programación adecuada de las etapas de calentamiento, mantenimiento y enfriamiento permite evitar consumos innecesarios de energía, así como minimizar

gradientes térmicos que puedan afectar la calidad del tratamiento. Los sistemas de control automatizados, integrados con sensores de alta precisión y software de monitoreo, facilitan la supervisión en tiempo real del proceso y la detección temprana de desviaciones operativas. Desde el punto de vista operativo, la selección del tipo de horno debe realizarse considerando factores como el volumen de producción, la geometría y dimensiones de las piezas, los requisitos de calidad superficial y las especificaciones técnicas del tratamiento térmico a aplicar. Un horno sobredimensionado o mal adaptado al proceso puede generar ineficiencias significativas y problemas de uniformidad térmica. La correcta operación y el mantenimiento preventivo de los hornos de tratamiento térmico son esenciales para garantizar la estabilidad del proceso, la seguridad del personal y la prolongación de la vida útil del equipo. Los programas de mantenimiento incluyen la inspección periódica de los elementos calefactores o quemadores, la verificación del estado del aislamiento térmico, la revisión de los sistemas de suministro de gas o energía eléctrica, así como la calibración regular de los instrumentos de medición y control de temperatura. Estas acciones permiten reducir fallas inesperadas, asegurar la repetibilidad del tratamiento y mantener la calidad de las piezas producidas [32]. Adicionalmente, en el contexto actual de la industria, se observa una tendencia creciente hacia la incorporación de tecnologías de digitalización y control inteligente en los hornos de tratamiento térmico. El uso de sistemas de monitoreo basados en sensores inteligentes, análisis de datos y mantenimiento predictivo contribuye a optimizar el consumo energético, mejorar la confiabilidad del proceso y facilitar la toma de decisiones operativas.

## 2.4 DISEÑO DE HORNOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Un horno de tratamiento térmico sigue el mismo diseño y principio de funcionamiento de una mufla (ver Figura 7) por lo que se pueden citar los mismos componentes que integran estos equipos, como lo son [15]:

1. Elemento generador: es el componente que proporciona el calor de trabajo, comúnmente proporcionado por resistencias eléctricas.
2. Sistema de alimentación de material: es el conjunto de elementos (alimentadores, transportadores, tolvas) que introducen la materia prima dentro de la cámara de calentamiento del equipo.
3. Cámara principal o zona de calentamiento: es el área interna del horno, también llamada cámara térmica, donde se colocan los productos a ser sometidos a alta temperatura.
4. Aislamiento térmico: son los materiales de alta resistencia a la transferencia de calor cuya función es retener el calor en el interior, mejorando la eficiencia energética del sistema y protegiendo el exterior al contacto del usuario.
5. Sistemas de instrumentación y control: son un conjunto de dispositivos (sensores, controladores) diseñados para el monitoreo y registro de las variables críticas (temperatura, presión, humedad) del proceso.

6. Sistema de suministro energético (combustible o cableado de potencia): son los sistemas críticos que proporcionan la energía (eléctrica o química) para el funcionamiento del equipo permitiendo alcanzar las altas temperaturas de operación.
7. Sistema de gestión atmosférica (ventiladores y sistemas de evacuación de gases): son componentes que gestionan el flujo de aire y los humos de combustión.
8. Sistema eléctrico de potencia y control: son el conjunto de conductores que alimenta de corriente eléctrica al horno para generar el calor de trabajo por medio de resistencias eléctricas.
9. Recubrimiento externo y estructura mecánica: es la capa externa del equipo, generalmente metálica con un acabado esmaltado, que funge como la carcasa principal del horno y una barrera de protección del usuario.

Considerando lo anterior, el diseño de un horno de tratamiento térmico considera que manera general la estructura del horno, los materiales que se utilizarán, así como la forma y tamaño del horno siendo importante considerar que los materiales deben ser capaces de soportar altas temperaturas y ser resistentes a la corrosión y la oxidación. En cuanto a la forma y tamaño del horno dependerá de las dimensiones de la pieza que se procesará, considerando adicionalmente el espacio dimensional para permitir la carga y descarga de las piezas sin interferir en la uniformidad de la temperatura o la integridad estructural del horno.



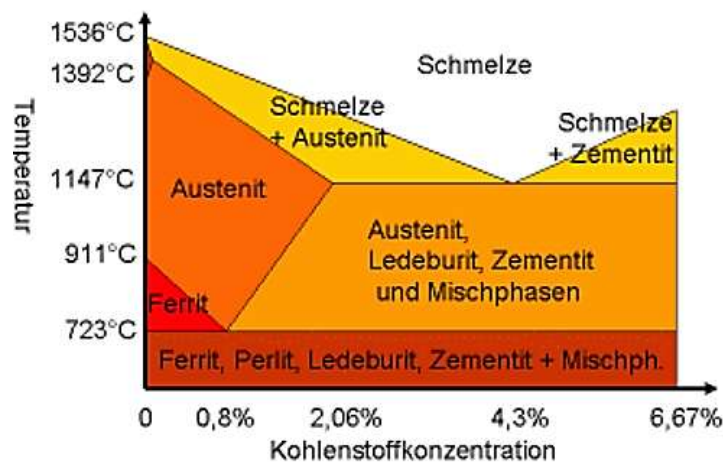
**Figura 7.** Horno de tratamiento térmico tipo mufla mostrando sus componentes principales [33].

## 2.4.1 Consideraciones de diseño estructural y térmico

El diseño efectivo de un horno de tratamiento térmico requiere la consideración simultánea de múltiples factores que determinan su desempeño operacional, eficiencia energética, seguridad y vida útil del equipo [34]:

### 1) Selección de materiales constructivos

Los materiales empleados deben exhibir propiedades adecuadas para soportar las condiciones severas de operación. Para la cámara de calentamiento se utilizan refractarios de alta alúmina, carburo de silicio (SiC) o materiales cerámicos avanzados capaces de mantener su integridad estructural a temperaturas superiores a 1200 °C sin deformación, agrietamiento o degradación química. Los materiales refractarios deben seleccionarse considerando su (a) temperatura máxima de servicio, (b) resistencia al choque térmico durante ciclos repetidos de calentamiento-enfriamiento, (c) estabilidad química frente a atmósferas oxidantes o reductoras, (d) conductividad térmica apropiada según la zona del horno y (e) resistencia mecánica a compresión para soportar cargas estructurales [34], [35]. Para el sistema de aislamiento térmico, la tendencia actual favorece el uso de materiales de baja masa térmica como fibras cerámicas, mantas aislantes y módulos prefabricados que permiten reducir considerablemente los tiempos de calentamiento y enfriamiento, disminuir el consumo energético y minimizar las tensiones térmicas en la estructura. La selección del espesor de aislamiento debe realizarse mediante análisis térmico considerando el balance entre la inversión inicial en material aislante y el ahorro energético a largo plazo [34], [36]. En este contexto, en la Figura 8, se presenta el diagrama de fases Fe-C mostrando las regiones de temperatura críticas para los diferentes tratamientos térmicos del acero, donde se identifican las fases presentes (ferrita, perlita, ledeburita, austenita, cementita y mezclas) en función de la concentración de carbono y temperatura, fundamentales para determinar los parámetros operacionales del horno. Las temperaturas de transformación mostradas (723, 911, 1147, 1392 y 1536 °C) son referencias esenciales para el diseño de ciclos térmicos específicos.



*Figura 8. Diagrama de fases Fe-C [37].*

## 2) Dimensionamiento geométrico y volumétrico

Las dimensiones de la cámara térmica deben calcularse considerando el volumen de carga máximo proyectado, permitiendo espacios libres mínimos de 50-100 mm entre las piezas y las paredes del horno para garantizar circulación adecuada del aire o gases atmosféricos y uniformidad en la distribución de temperatura. La relación entre el volumen útil de carga y el volumen total de la cámara (factor de utilización) debe optimizarse para maximizar la productividad sin comprometer la calidad del tratamiento. Típicamente, factores de utilización entre 0.4-0.6 ofrecen el mejor balance entre uniformidad térmica y aprovechamiento del espacio [34].

## 3) Configuración geométrica del horno

La forma de la cámara de calentamiento (rectangular, cilíndrica, tipo campana) debe seleccionarse considerando el tipo de piezas a tratar, el método de carga (frontal, superior, lateral), los requisitos de uniformidad térmica y las limitaciones de espacio en la planta industrial. Hornos rectangulares ofrecen mayor versatilidad para tratamiento de piezas de geometrías variadas, mientras que hornos cilíndricos proporcionan mejor distribución térmica para cargas simétricas y homogéneas [35], [36].

## 4) Análisis de transferencia de calor:

El diseño térmico debe considerar los tres mecanismos de transferencia de calor: conducción a través de las paredes y aislamiento, convección entre las superficies y el medio gaseoso interior, y radiación térmica entre las resistencias de calentamiento y las piezas a tratar. A temperaturas superiores a 600°C, la radiación térmica se convierte en el mecanismo dominante de transferencia de calor, representando hasta el 80% del calor total transmitido a las piezas. El diseño debe optimizar la disposición de las resistencias para maximizar la eficiencia de calentamiento radiante y minimizar gradientes térmicos en la zona de trabajo [34], [36].

## 5) Cálculo de potencia de calentamiento

La determinación de la potencia eléctrica instalada debe considerar: (a) energía requerida para elevar la temperatura de las piezas desde temperatura ambiente hasta la temperatura de tratamiento, (b) energía necesaria para calentar la masa térmica del horno (refractarios, aislantes, estructura), (c) pérdidas térmicas por conducción a través de paredes, techo y piso, (d) pérdidas por convección y radiación desde superficies externas, (e) pérdidas durante operaciones de apertura de puertas para carga y descarga, y (f) un factor de seguridad típicamente entre 1.15-1.30 para garantizar capacidad de calentamiento adecuada y compensar degradación de resistencias con el tiempo [34], [35].

## 6) Sistemas de seguridad integrados:

El diseño moderno de hornos de tratamiento térmico incorpora múltiples sistemas de seguridad redundantes incluyendo: (a) termostatos de límite independientes que interrumpen el suministro de potencia ante

sobrecalentamiento, (b) interruptores de puerta que impiden operación con accesos abiertos, (c) sistemas de ventilación de emergencia para evacuación rápida de gases en caso de falla atmosférica, (d) alarmas audibles y visuales para condiciones anormales, (e) sistemas de extinción automática de incendios, y (f) paros de emergencia accesibles desde múltiples ubicaciones [35], [36].

### 7) Consideraciones de eficiencia energética

El consumo energético de hornos de tratamiento térmico representa un costo operativo significativo, por lo que el diseño debe incorporar estrategias de eficiencia como: (a) optimización del espesor y tipo de aislamiento térmico, (b) sistemas de recuperación de calor de gases de escape, (c) control preciso de temperatura mediante algoritmos PID avanzados para minimizar sobre impulsos térmicos, (d) zonificación térmica con control independiente de diferentes secciones del horno, (e) sistemas de precalentamiento de piezas utilizando calor residual, y (f) programación inteligente de cargas para maximizar ocupación y minimizar ciclos de calentamiento en vacío [34], [36].

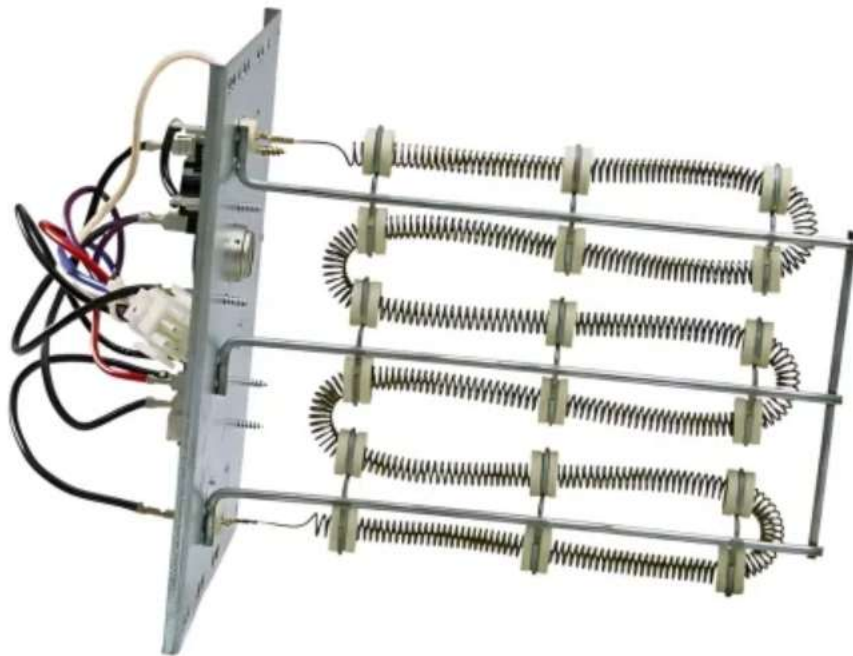
## 2.5 MANUFACTURA DE HORNOS DE TRATAMIENTO TÉRMICO

Dado que el horno de tratamiento térmico opera bajo principios de funcionamiento similares a los de una mufla eléctrica, es posible adoptar criterios constructivos análogos para su diseño y manufactura. El proceso de fabricación inicia con la conformación de la cámara de calentamiento, la cual se construye a partir de ladrillo refractario dispuesto en una geometría previamente definida. Este material cumple una doble función: por una parte, proporciona aislamiento térmico al volumen de trabajo y, por otra, presenta una baja inercia térmica, lo que permite reducir la cantidad de energía requerida para elevar y mantener la temperatura de operación, favoreciendo así la eficiencia energética del sistema. Una vez finalizada la estructura refractaria, se procede a la instalación de los elementos calefactores, responsables de suministrar la energía térmica al interior de la cámara. Dichos elementos se fabrican comúnmente a partir de aleaciones de níquel-cromo, dispuestas en forma de espiral, y su selección en términos de calibre y longitud debe basarse en un análisis termodinámico que garantice el alcance de las temperaturas de operación requeridas. Con el propósito de minimizar las pérdidas de calor hacia el ambiente, se incorpora un sistema de aislamiento adicional mediante colcha cerámica, la cual contribuye de manera significativa a mejorar el desempeño térmico global del horno. Para la instrumentación del sistema, se emplean generalmente termopares tipo K, y en aplicaciones específicas, tipo R o S, debido a su amplio rango de medición y adecuada relación costo-beneficio. Finalmente, el sistema de control térmico se complementa con una etapa de potencia, comúnmente basada en relevadores de estado sólido, que permite el accionamiento seguro y eficiente de los elementos calefactores [38], [39].

La configuración geométrica de la cámara debe calcularse considerando la relación superficie-volumen óptima que minimice las pérdidas por conducción y radiación, los cuales son aspectos fundamentales en el diseño térmico de estos equipos [40] basados en:

### i. Instalación del sistema de calentamiento

Una vez completada la estructura refractaria, se procede a la instalación de las resistencias eléctricas, que constituyen el corazón del sistema de calentamiento. Estos elementos son los responsables de la conversión de energía eléctrica en energía térmica mediante efecto Joule, transfiriéndola posteriormente a la carga mediante radiación y convección. Las resistencias se fabrican preferentemente con aleación Níquel-Cromo (NiCr), típicamente en proporción 80/20 (Nichrome 80) o 60/15 (Nichrome 60), materiales que ofrecen excelente resistencia a la oxidación a altas temperaturas y estabilidad dimensional prolongada. La configuración geométrica en espiral es la más utilizada debido a que maximiza la superficie de emisión térmica por unidad de longitud, incrementando la transferencia de calor por radiación [41]. Como se observa en la Figura 9, las resistencias se montan sobre soportes cerámicos aislantes que mantienen la separación adecuada entre espiras y facilitan la distribución uniforme del calor en la cámara.



*Figura 9. Resistencias eléctricas en espiral de aleación Níquel-Cromo [42].*

La determinación del calibre (diámetro) y longitud total de la resistencia requiere un análisis termodinámico riguroso que considere múltiples variables: temperatura máxima de operación, potencia térmica requerida, resistencia eléctrica del material, densidad de potencia superficial permisible, y las características del ciclo térmico deseado. La densidad de potencia superficial es particularmente crítica, ya que valores excesivos pueden provocar el sobrecalentamiento localizado y falla prematura de las resistencias [40]. El arreglo mostrado en la Figura 9

permite una distribución espacial óptima de las resistencias, asegurando un campo térmico homogéneo dentro de la cámara de calentamiento.

### ii. Sistema de aislamiento térmico secundario

Con el objetivo de minimizar las pérdidas energéticas por conducción térmica hacia el exterior y mejorar la eficiencia del sistema, se incorpora un aislamiento secundario mediante fibra cerámica refractaria, comúnmente denominada "colcha cerámica" o "manta cerámica". Este material, compuesto principalmente por aluminosilicatos en forma de fibras, presenta una conductividad térmica extremadamente baja y puede soportar temperaturas de hasta 1400 °C dependiendo de su clasificación. La fibra cerámica se instala en capas concéntricas rodeando la estructura de ladrillo refractario (ver Figura 10), creando una barrera adicional que reduce drásticamente el gradiente térmico entre la cámara de calentamiento y el ambiente. La incorporación de este aislamiento secundario puede incrementar la eficiencia termodinámica del sistema entre 20% y 35%, dependiendo del espesor y calidad de la fibra empleada [43]. Adicionalmente, este aislamiento reduce significativamente la temperatura superficial externa del horno, mejorando la seguridad operacional y reduciendo riesgos de quemaduras para el personal.



*Figura 10. Ladrillos refractarios utilizados en la construcción de cámaras de calentamiento para hornos de tratamiento térmico [44].*

### iii. Instrumentación y control de temperatura

La instrumentación precisa de la temperatura es fundamental para garantizar la calidad y repetibilidad de los tratamientos térmicos. En hornos eléctricos tipo mufla, el termopar tipo K (Chromel-Alumel) representa el método de medición por excelencia, ofreciendo un rango operativo amplio con precisión adecuada para la mayoría de las aplicaciones industriales [41]. Para aplicaciones que requieren temperaturas superiores o mayor precisión, se emplean termopares tipo R (Platino - Platino/Rodio 13%) o tipo S (Platino - Platino/Rodio 10%), que pueden operar hasta 1600 °C con mayor estabilidad a largo plazo. La selección del tipo de termopar debe considerar no solamente

el rango de temperatura, sino también la atmósfera de operación, la vida útil esperada, y la relación costo-beneficio para la aplicación específica [45]. La ubicación estratégica de los termopares dentro de la cámara es crucial para obtener lecturas representativas del proceso térmico, evitando zonas con gradientes pronunciados y la exposición directa a la radiación de las resistencias.

#### **iv. Sistema de control y potencia**

Todo sistema de control de temperatura debe estar integrado con una etapa de potencia apropiada que module la energía suministrada a las resistencias. Los relevadores de estado sólido (SSR, por sus siglas en inglés) constituyen la tecnología estándar para esta aplicación, superando a los contactores electromagnéticos tradicionales en múltiples aspectos. Los SSR operan mediante semiconductores de potencia (típicamente tiristores o triacs) que permiten conmutación silenciosa, ausencia de arco eléctrico, vida útil prácticamente ilimitada, y tiempos de respuesta del orden de milisegundos. Estas características posibilitan la implementación de estrategias de control avanzadas como el control proporcional mediante modulación de ancho de pulso (PWM) o control de fase, que mejoran significativamente la precisión y estabilidad térmica del horno [43]. El controlador de temperatura, típicamente un PID (Proporcional-Integral-Derivativo), procesa la señal del termopar y genera una salida modulada que activa proporcionalmente el SSR, logrando una regulación precisa de la temperatura con desviaciones mínimas en condiciones estables de operación.

### III. METODOLOGÍA

En esta sección se describen las actividades de diseño mecánico realizadas para la construcción del horno de tratamiento térmico en trabajos posteriores.

#### 3.1 DISEÑO MECÁNICO DEL HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO

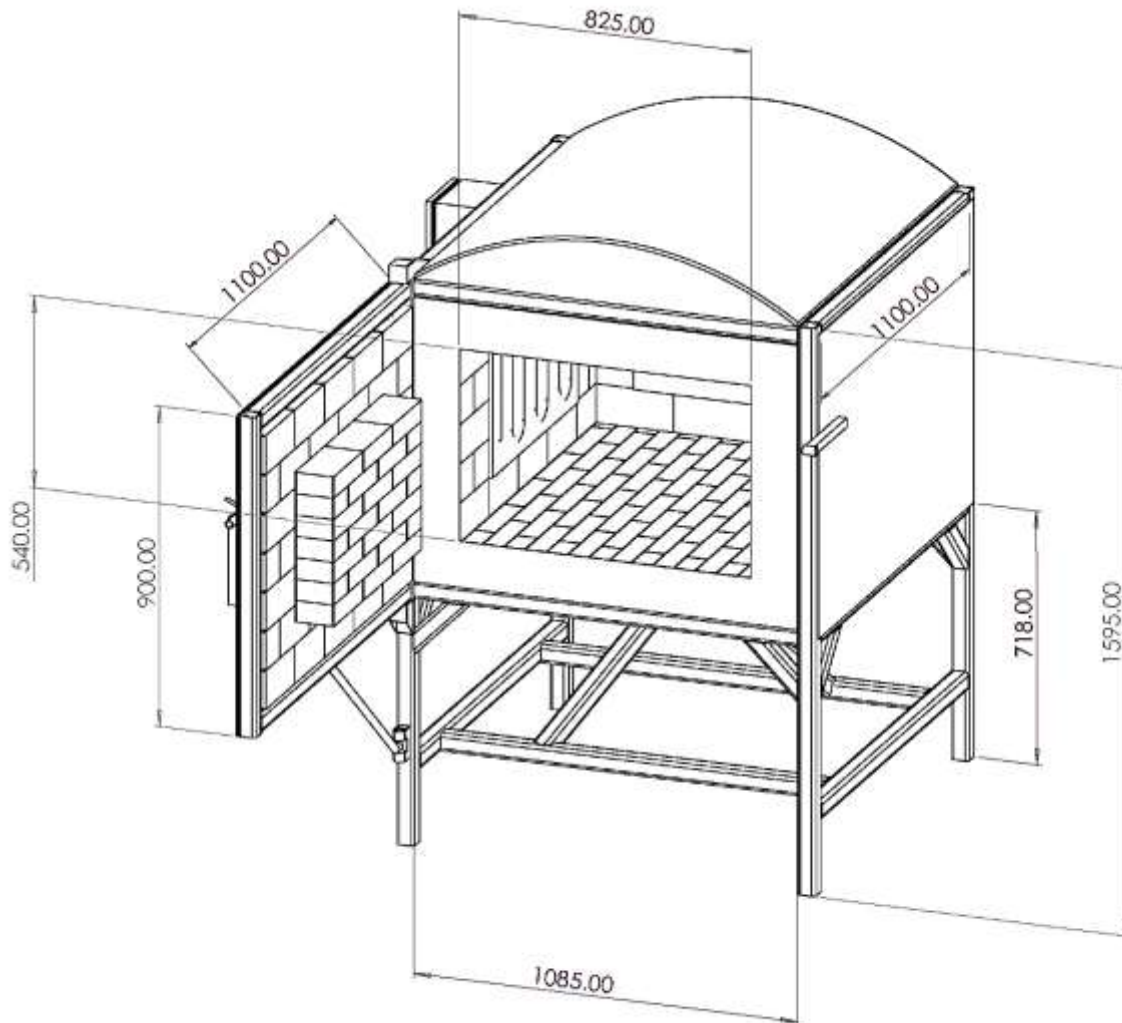
Todos los diseños asociados al horno de tratamiento térmico fueron desarrollados mediante el uso del software de diseño asistido por computadora (CAD) en tres dimensiones SolidWorks®. A partir de esta herramienta se definió de manera precisa la configuración geométrica, las dimensiones generales y la disposición de los principales componentes mecánicos del prototipo por lo que ninguna ecuación de diseño fue empleada. El diseño del horno se estableció bajo una geometría tipo caja, la cual fue seleccionada considerando su simplicidad constructiva, facilidad de manufactura y adecuada integración de los elementos estructurales y de acceso. Los diseños elaborados permitieron validar dimensiones, materiales y el funcionamiento del sistema previo a su construcción.

La definición dimensional del prototipo tomó como referencia diversos trabajos previamente reportados en la literatura especializada [46]–[52], en los cuales se documenta el diseño y construcción de hornos de tratamiento térmico a nivel laboratorio o prototipo. El análisis de dichos estudios permitió identificar criterios comunes de diseño, así como los tipos de materiales empleados para la fabricación de la cámara térmica, la estructura de soporte y los elementos auxiliares, información que fue considerada como punto de partida para el presente trabajo. No obstante, es importante destacar que el diseño propuesto en este estudio contempla dimensiones de la cámara térmica considerablemente mayores en comparación con las reportadas en [46]–[52], ver Tabla 1. Este aumento dimensional responde a la necesidad de disponer de un volumen de trabajo superior, orientado a la futura aplicación del horno en el tratamiento térmico de piezas metálicas de mayor tamaño, manteniendo el enfoque a nivel prototipo y sin comprometer la viabilidad de su posterior construcción.

En la Figura 11, se presenta un dibujo técnico del diseño en el que se aprecia el diseño completo del prototipo propuesto. En dibujo técnico se presentan con las cotas principales. Demas dimensiones a detalle no son presentadas por tema de patentado. En la Tabla 2, se describen de manera general los tipos de acabados de materiales empleados en la elaboración de los diseños. Debido a que SolidWorks® no cuenta con materiales refractarios específicos, se implementaron materiales cerámicos personalizados con propiedades térmicas y mecánicas reportadas en la literatura, garantizando una representación realista del comportamiento térmico del horno.

**Tabla 1.** Dimensiones de la cámara térmica de hornos reportados en la literatura.

Dimensiones (m <sup>3</sup> )	Referencia
0.0097	[46]
0.013	[47]
0.0068	[48]
0.085	[49]
0.079	[50]
0.037	[51]
0.0019	[52]



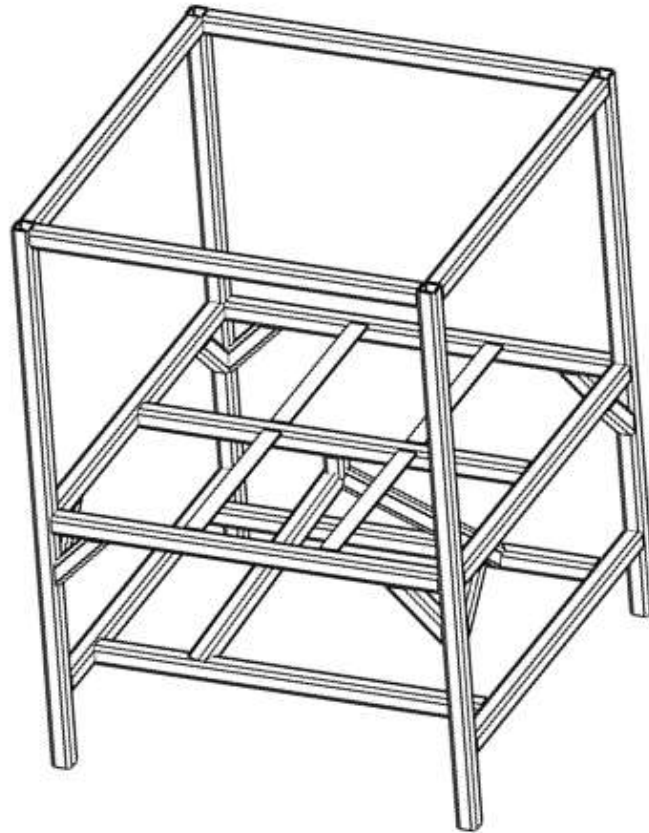
**Figura 11.** Dibujo técnico del horno de tratamiento térmico propuesto.

**Tabla 2.** Biblioteca de materiales de documentación de diseño y simulación en SolidWorks®.

Componente / Módulo	Material en SolidWorks®	Tipo de material	Observaciones técnicas
Estructura de soporte (PTR 2×2" cal. 14)	ASTM A36 / Plain Carbon Steel	Acero estructural	El calibre se define por el espesor geométrico ( $\approx 1.9$ mm). Adecuado para análisis estructural.
Cámara térmica (ladrillo M-25 y K-32)	Ladrillo refractario personalizado	Cerámica personalizada	Definir densidad, conductividad térmica y calor específico con base en literatura técnica.
Mortero refractario	No modelado	Consumible	Se asume continuidad térmica entre ladrillos. Se declara únicamente en la BOM.
Placa de fibra cerámica con resistencias	Fibra cerámica aislante personalizada	Aislante térmico	Se modela solo la placa. El calentamiento se aplica como carga térmica.
Techumbre (cúpula)	Ladrillo refractario personalizado	Cerámica personalizada	Se recomienda usar el mismo material que la cámara para continuidad térmica.
Puerta del horno (estructura)	Plain Carbon Steel	Acero estructural	Incluye marco, bisagras y refuerzos.
Puerta del horno (recubrimiento)	Ladrillo refractario personalizado	Cerámica personalizada	Contribuye al aislamiento térmico y cierre hermético.
Recubrimiento externo (lámina cal. 14)	Low Carbon Steel	Acero laminado	Modelado como chapa metálica; espesor $\approx 1.9$ mm.
Piso cerámico	Cerámica genérica	Cerámica	No se considera elemento estructural.
Bisagras y cerrojo	Plain Carbon Steel	Acero	Se consideran componentes mecánicos estándar.
Termopar tipo K	No simulado	Instrumentación	Se usa como referencia experimental, no como elemento de simulación.

### 3.1.1 Diseño de la estructura de soporte

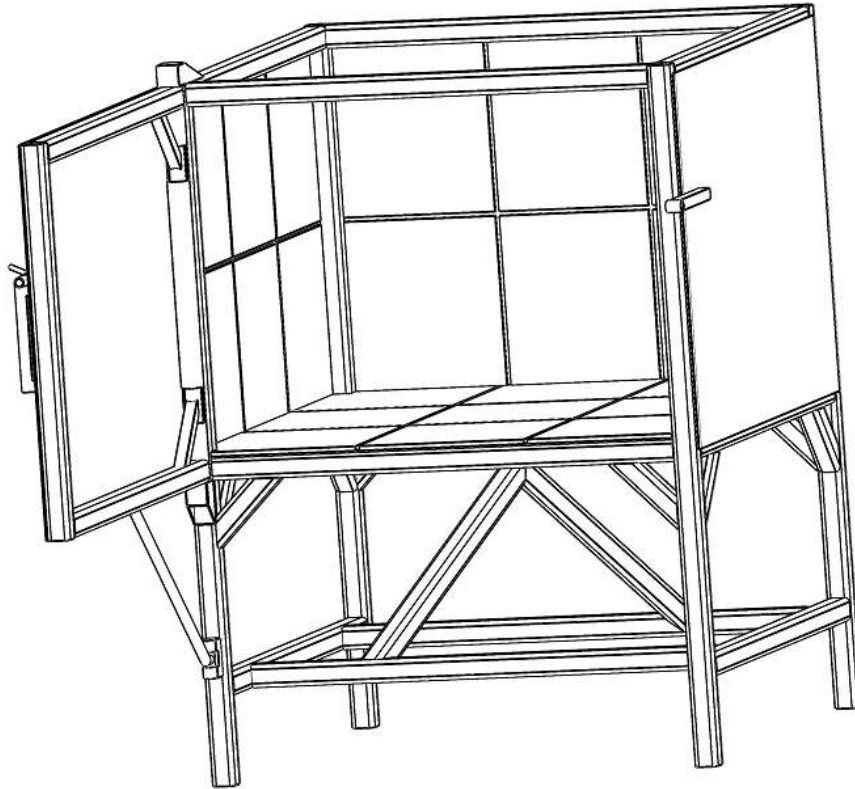
Construida bajo una configuración geométrica tipo caja para el montaje y ensamblaje de los demás componentes del horno. Particularmente, se consideró una estructura portante de un nivel (plataforma horizontal de soporte), diseñada para el montaje y soporte de la cámara térmica con el objetivo de soportar de manera segura las cargas estáticas y térmicas generadas por el peso propio de la cámara. En la Figura 12, se muestra el diseño de la estructura de soporte propuesta.



*Figura 12. Estructura de soporte del horno.*

### 3.1.2 Diseño del recubrimiento externo de seguridad

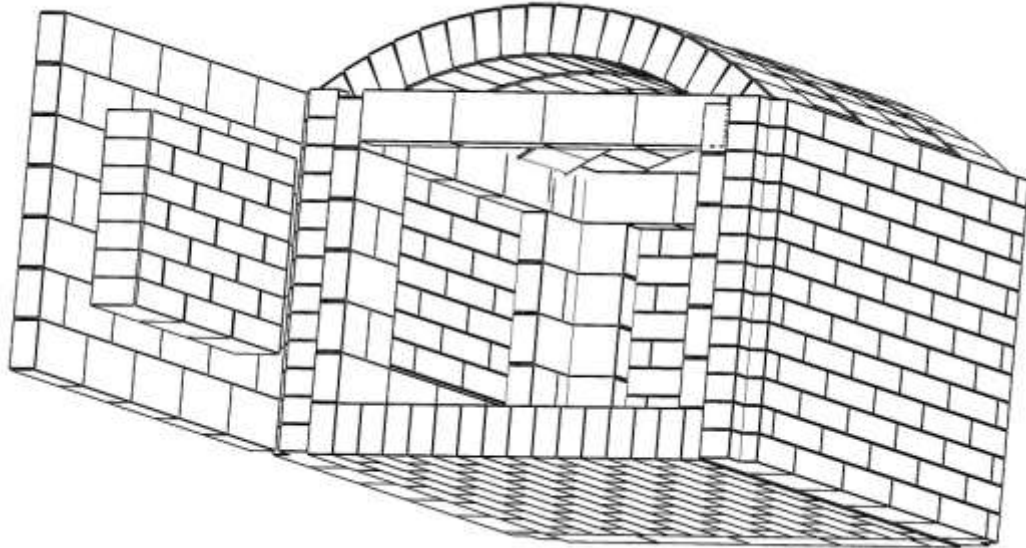
A la estructura de soporte se le incorporó un recubrimiento externo de seguridad, cuya finalidad principal es reducir y bloquear la transmisión de calor desde el interior de la cámara térmica hacia el entorno exterior del equipo. Este recubrimiento actúa como una barrera térmica y de protección, minimizando el riesgo de contacto con superficies a temperaturas elevadas y garantizando condiciones seguras para el usuario durante la operación y mantenimiento del horno de tratamiento térmico. El diseño del recubrimiento se basó en el empleo de placas de lámina de acero, fijadas mecánicamente a la estructura de soporte, las cuales proporcionan rigidez estructural, protección mecánica y estabilidad dimensional. Dichas placas fueron revestidas internamente con una cubierta de material cerámico aislante, seleccionada por su baja conductividad térmica y resistencia a altas temperaturas, lo que permite limitar la transferencia de calor por conducción y radiación, contribuyendo además a la eficiencia térmica del sistema y a la protección de los componentes estructurales externos. En la Figura 13, se observa el diseño de la estructura de soporte con recubrimiento externo de seguridad.



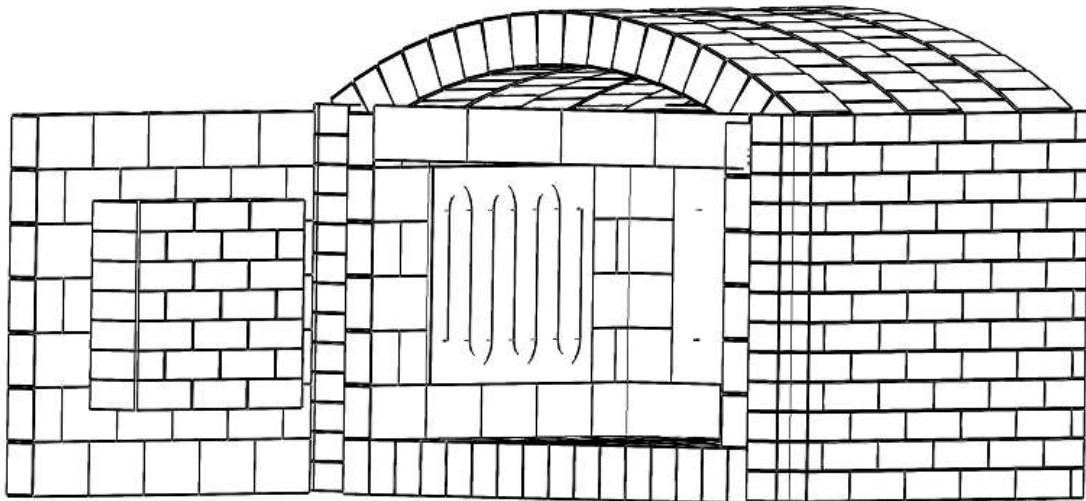
*Figura 13. Recubrimiento externo de seguridad: vista de placas y piso cerámico integrado a la estructura.*

### 3.1.3 Diseño de la cámara térmica

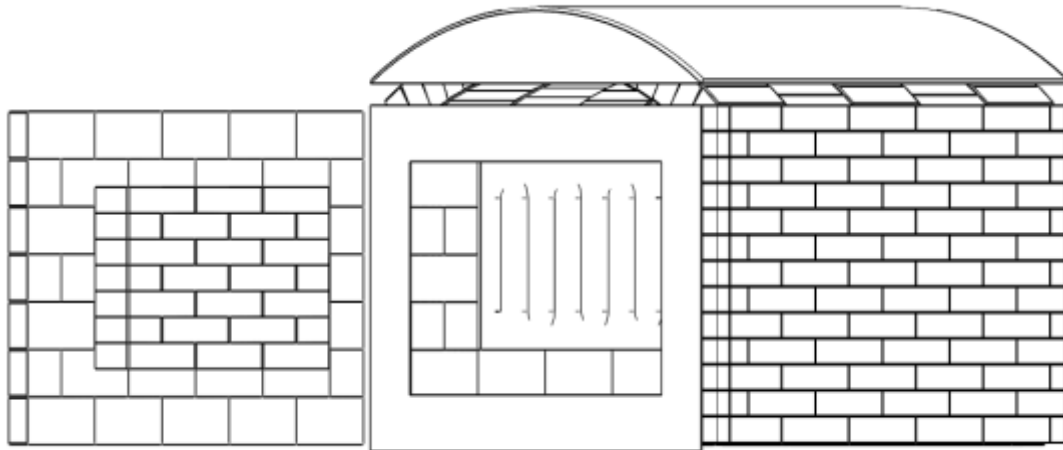
El diseño de la cámara térmica se elaboró considerándola como el área destinada al calentamiento y confinamiento del calor, provista de aislamiento térmico a base de ladrillo refractario, así como de un sistema de calentamiento integrado, constituido por placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas incorporadas. El diseño contempló la conformación del cuerpo de la cámara térmica mediante una primera capa de ladrillos refractarios, colocada en el perímetro interno de la estructura de soporte. Posteriormente, se consideró una segunda capa de ladrillo refractario, la cual incorpora un vano hueco destinado a la colocación y empotre de las placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas, permitiendo su adecuada fijación y operación. La techumbre del horno se configuró con una geometría tipo cúpula, cuya curvatura y dimensiones permiten cubrir completamente el volumen interno del prototipo, favoreciendo una mejor distribución térmica en la cámara. Finalmente, se diseñó la puerta del equipo con ejes de giro reforzados, a fin de garantizar una apertura y cierre seguros, estables y con un esfuerzo mínimo por parte del usuario. Adicionalmente, la puerta fue recubierta con una capa refractaria, e incorpora una capa central sobresaliente, diseñada para funcionar como un sistema de cierre hermético, reduciendo pérdidas de calor durante la operación del horno. De la Figura 14 a la 18, se muestran diseños de la cámara térmica y sus componentes.



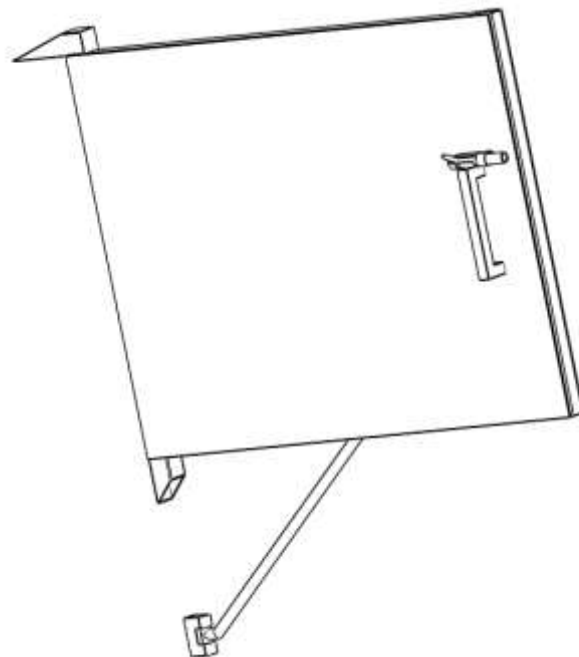
*Figura 14. Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios sin placas de cerámica.*



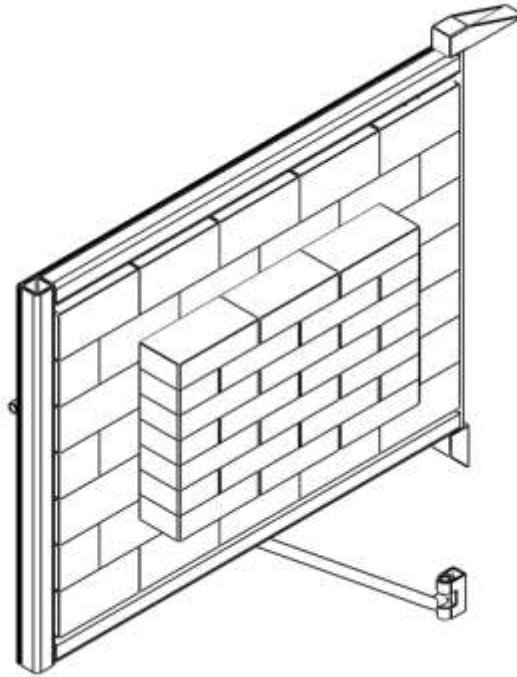
*Figura 15. Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios con placas de cerámica.*



*Figura 16. Cámara térmica completa y con sellado de mortero en cúpula y puerta.*



*Figura 17. Puerta de cierre hermético con sistema de bisagras: vista exterior.*



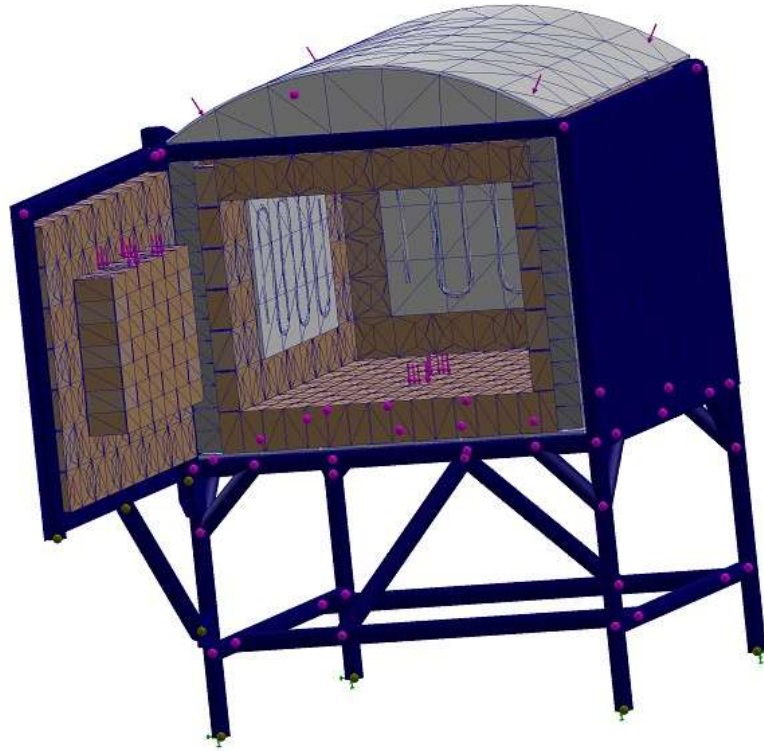
*Figura 18. Puerta de cierre hermético con sistema de bisagras: vista interna.*

### 3.2 ANÁLISIS ESTRUCTURAL Y TÉRMICO

Mediante la herramienta de SolidWorks® Simulation se llevó a cabo un simple análisis estructural y/o térmico por el método de elementos finitos (FEA, en sus siglas en inglés) de la cámara de calentamiento del horno para validar su respuesta a cargas mecánicas y térmicas. En la Figura 19, se muestra la etapa de mallado del diseño. En las Tablas 3, 4 y 5 se detallan las condiciones de la simulación empleadas.

**Tabla 3:** Propiedades de materiales para el análisis estructural FEA.

PROPIEDAD DEL MATERIAL	MAGNITUD	PROPIEDAD	MAGNITUD
Tipo	Acero estructural	Módulo de compresibilidad	166.67 GPa
Densidad	7850 kg/m <sup>3</sup>	Módulo de corte	76.923 GPa
Módulo de Young	200 GPa	Coefficiente isotrópico secante de expansión térmica	12×10 <sup>-6</sup> / °C
Coefficiente de Poisson	0.3	Limite elástico	250 MPa



*Figura 19. Construcción del mallado del diseño del equipo para análisis estructural y térmico.*

**Tabla 4:** Propiedades de materiales para el análisis térmico FEA.

PROPIEDAD	LÁMINA DE ACERO	REFRACTARIO CON MUESTRA
Material	Acero 1008	Ladrillo refractario + mortero
Densidad [kg/m <sup>3</sup> ]	7850	1800
Conductividad térmica [W/m °C]	50	1.35
Calor específico [J/kg °C]	490	880
Emisividad	0.25	0.85

**Tabla 5.** Condiciones de operación y parámetros térmicos.

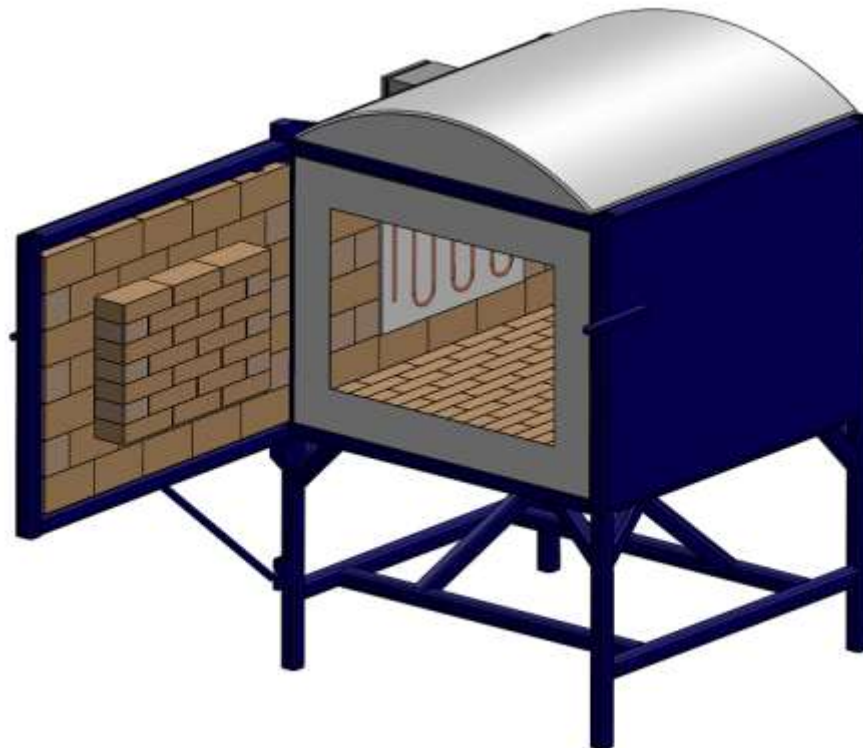
<b>PARÁMETRO</b>	<b>VALOR</b>	<b>UNIDAD</b>
Temperatura interior del horno	900	°C
Temperatura ambiente	25	°C
Espesor de lámina metálica	4	mm
Espesor de refractario	100	mm
Coefficiente de convección interior ( $h_1$ )	15	W/m <sup>2</sup> ·K
Coefficiente de convección exterior ( $h_2$ )	10	W/m <sup>2</sup> ·K
Resistencia térmica total	0.241	m <sup>2</sup> ·K/W

## IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

### 4.1 DISEÑOS MECÁNICOS OBTENIDOS

Para facilidad de comprensión de los diseños elaborados, y para apreciar una mejor nitidez de diseño, se presentan los mismos mediante acercamientos, giros y especificando la función que cumple. Los diseños del horno permitieron su futura construcción de manera orientada y sin contratiempos. De la Figura 20 a la 29 se presentan vistas isométricas del sistema sin cotas por cuestiones de patentado. En general los diseños comprenden:

- a) Estructura de soporte. Construida bajo una configuración geométrica tipo caja para el montaje y ensamblaje de los demás componentes del horno.
- b) Cámara térmica. Área de calentamiento y confinamiento de calor provista con aislante térmico y con el sistema de calentamiento integrado.
- c) Recubrimiento externo de seguridad. Mantiene la superficie exterior a una temperatura segura para el usuario mientras el equipo está en funcionamiento



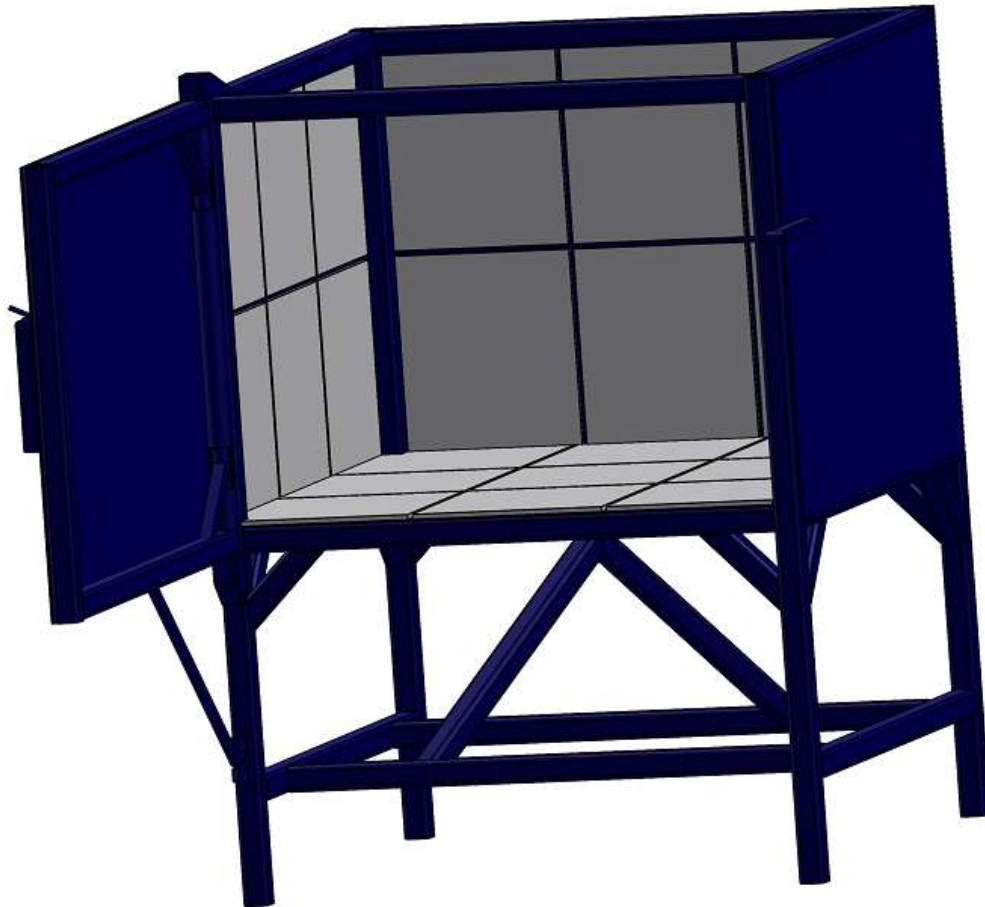
*Figura 20. Diseño mecánico completo del horno de tratamiento térmico.*



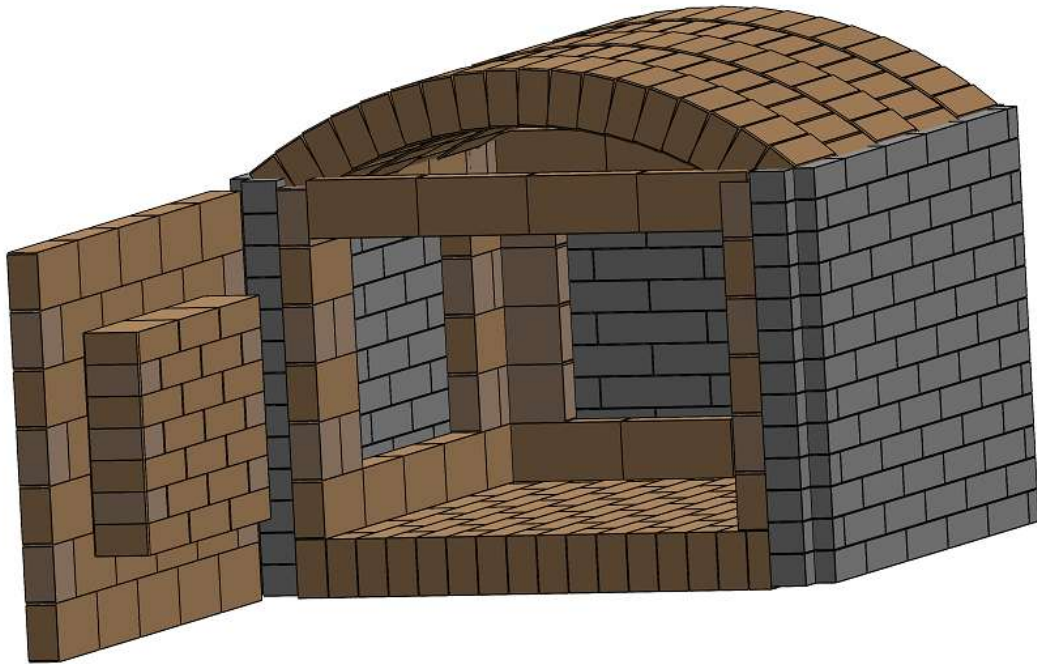
*Figura 21. Estructura de soporte del horno, vista de la base principal.*



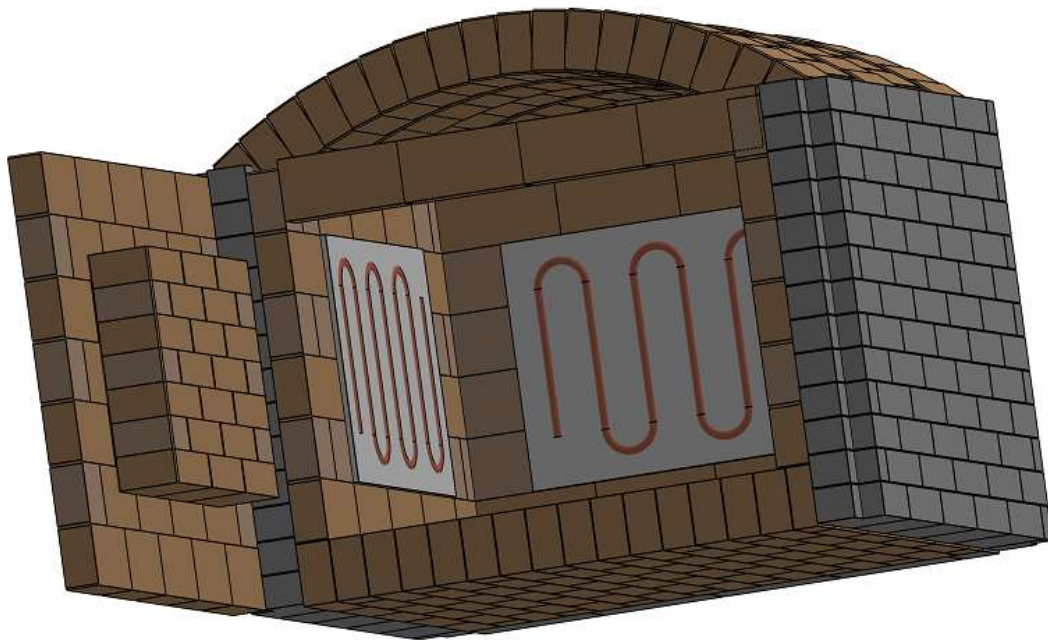
*Figura 22. Recubrimiento externo de seguridad, vista de la estructura con placas.*



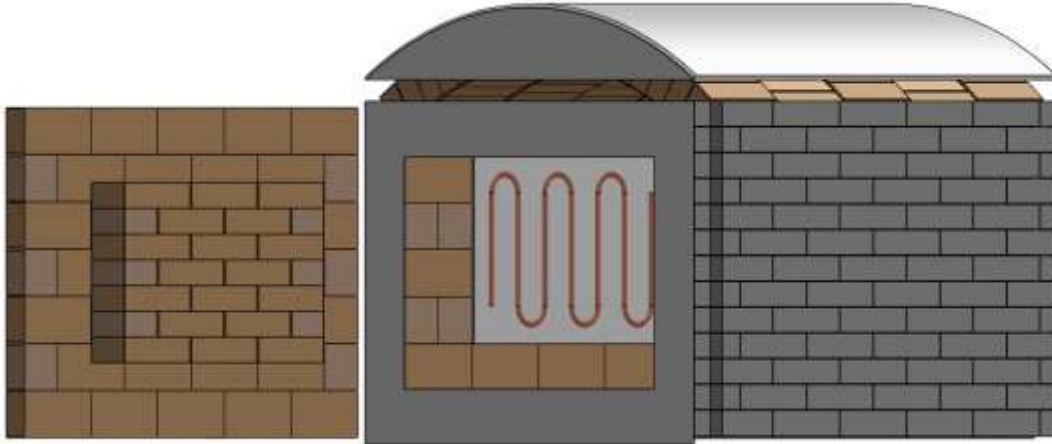
*Figura 23. Cámara térmica con el recubrimiento externo de seguridad.*



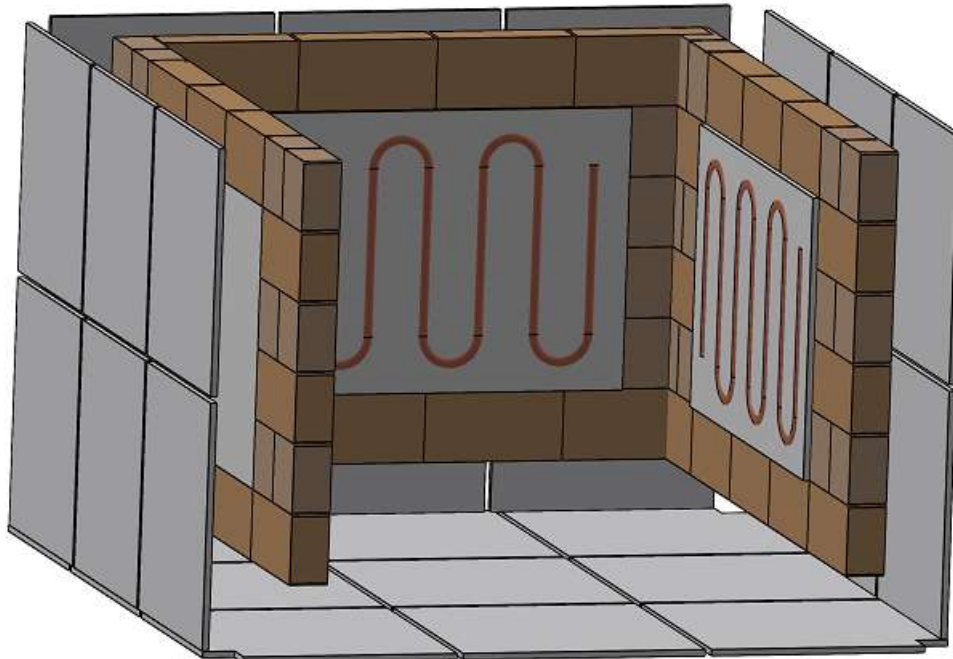
*Figura 24. Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios sin placas de cerámica.*



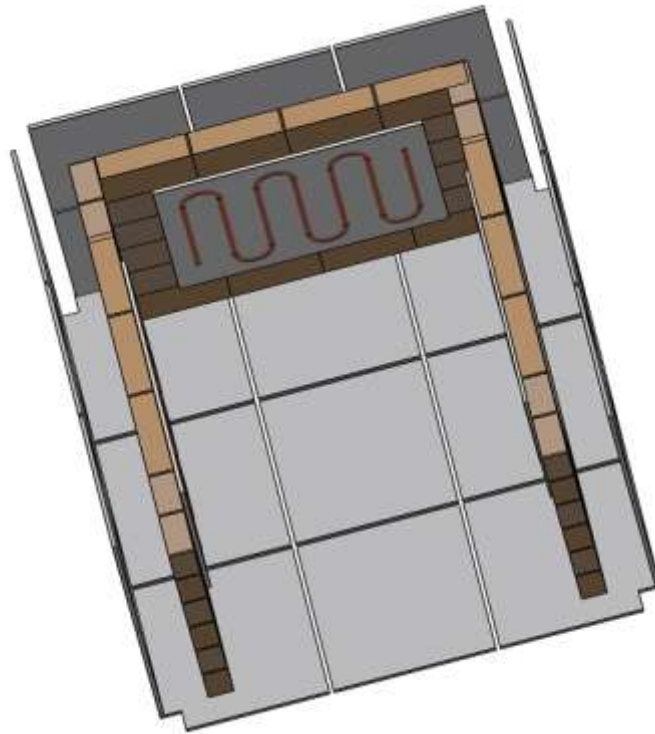
*Figura 25. Cámara térmica, vista del almacén de ladrillos refractarios con placas de cerámica.*



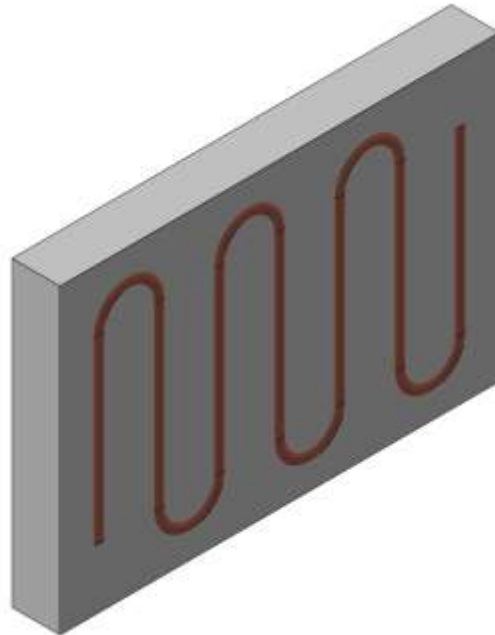
*Figura 26. Cámara térmica completa y con sellado de mortero en cúpula y puerta.*



*Figura 27. Recubrimiento de piso cerámico relativo a la cámara térmica y las placas.*



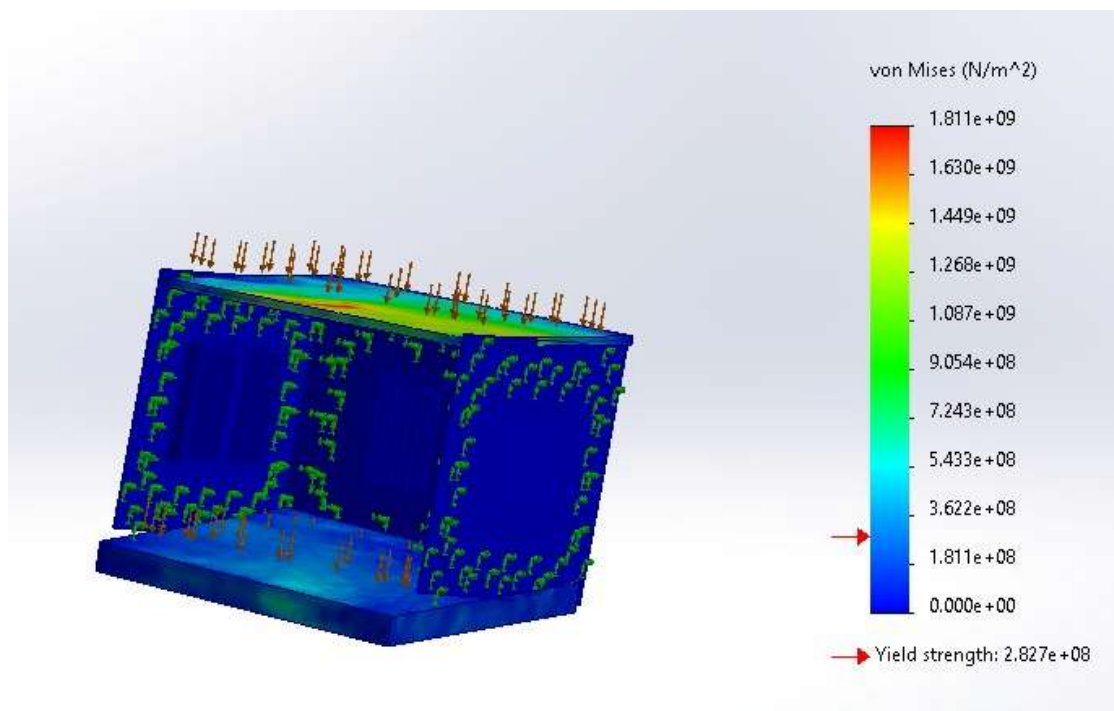
*Figura 28. Recubrimiento de piso cerámica relativo a la cámara térmica y las placas: vista alzada.*



*Figura 29. Placa cerámica.*

## 4.2 RESULTADOS DE SIMULACIÓN

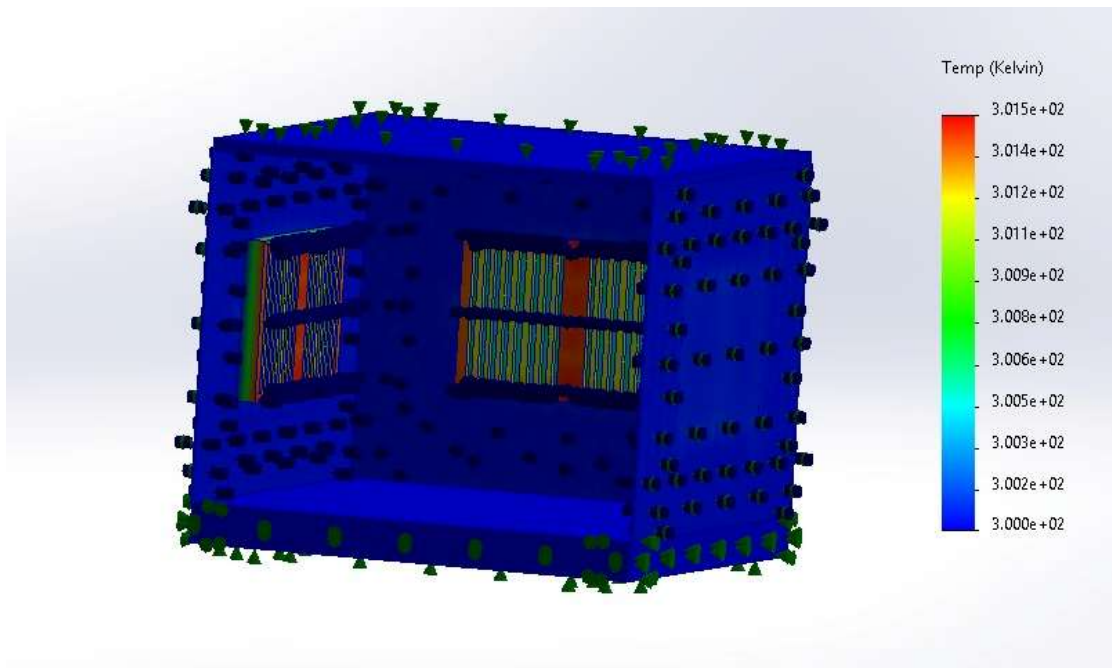
El esfuerzo equivalente de von Mises en la cámara térmica presenta un rango que va desde valores cercanos a 0 N/m<sup>2</sup> en la mayor parte del volumen estructural hasta un valor máximo aproximado de  $1.81 \times 10^9$  N/m<sup>2</sup> ( $\sigma_v M_{max}$ ), localizado principalmente en la placa superior donde se concentran las cargas aplicadas. Al comparar este valor con el límite elástico del material, de  $2.83 \times 10^8$  N/m<sup>2</sup> ( $\sigma_y$ ), se observa que los esfuerzos máximos ( $\sigma_v M_{max} / \sigma_y$ ) superan dicho umbral en un factor cercano a 6.4, lo que indica que, bajo las condiciones de carga y sujeción simuladas, la estructura excede ampliamente el régimen elástico y entraría en deformación plástica. Aunque la mayor parte de la cámara opera en niveles de esfuerzo inferiores al límite de fluencia, las concentraciones críticas identificadas en la tapa superior y en zonas cercanas a restricciones y aristas representan puntos potenciales de falla mecánica, comprometiendo la integridad estructural del diseño en su configuración actual. En la Figura 30, se presenta el análisis FEA estructural de la cámara térmica obtenido.



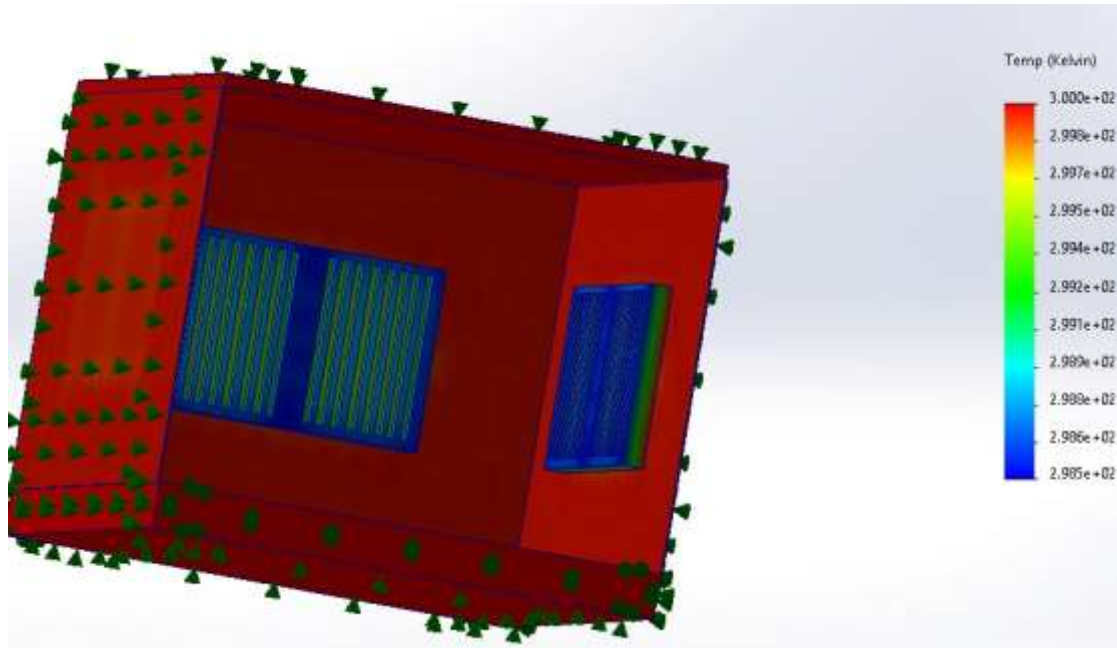
*Figura 30. Análisis estructural FEA de la cámara térmica.*

La interpretación cuantitativa de los análisis térmicos por elemento finito indica que la cámara térmica presenta un adecuado aislamiento térmico entre el interior y el exterior. En el análisis del exterior de la cámara, la distribución de temperatura se mantiene en un rango aproximado de 300 K a 301.5 K (26.9 °C a 28.4 °C), observándose que la mayor parte de las superficies externas permanece cercana a la temperatura ambiente (~300

K), con incrementos térmicos muy localizados y de baja magnitud, lo que sugiere una transferencia de calor limitada hacia el entorno, ver Figura 31. Por su parte, el análisis del interior de la cámara muestra un rango de temperaturas cercano a 299.6 K a 300.0 K (26.5 °C a 26.9 °C), evidenciando una distribución térmica relativamente homogénea dentro del volumen interno y gradientes térmicos reducidos. La diferencia máxima de temperatura entre el interior y el exterior es del orden de 1.5 K, lo cual confirma que los materiales y espesores seleccionados para la cámara térmica proporcionan un buen desempeño como barrera térmica, minimizando las pérdidas de calor y contribuyendo a la estabilidad térmica del sistema durante su operación, ver Figura 32.



*Figura 31. Análisis térmico FEA de la cámara térmica en su exterior.*



*Figura 32. Análisis térmico FEA de la cámara térmica en su interior.*

## V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se diseñó un horno de tratamiento térmico hecho a la medida para aplicaciones metal-mecánicas de  $1100 \times 1085 \times 1595$  mm con una cámara térmica de  $0.52 \text{ m}^3$  revestida con ladrillo refractario y empleando 3 placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas 4000W 220V. En general, los diseños del horno se basaron en una configuración arquitectónica de tipo caja consistente de una estructura de soporte, una cámara térmica y un recubrimiento externo de seguridad. A partir del diseño mecánico desarrollado en software CAD 3D, fue posible definir una configuración estructural robusta, funcional y segura, capaz de soportar las condiciones térmicas y mecánicas asociadas a la operación del equipo. La selección de materiales para la conformación de los diseños, particularmente el uso de ladrillo refractario, placa de fibra cerámica de resistencia eléctrica y acero estructural, permitirán garantizar un adecuado confinamiento del calor, minimizando las pérdidas térmicas hacia el exterior y asegurando condiciones de operación seguras para el usuario. La incorporación de un recubrimiento externo de seguridad y de una puerta con sistema de cierre hermético contribuirá significativamente a la eficiencia térmica del horno y a la protección durante su uso.

El análisis estructural por elemento finito indica que el esfuerzo equivalente de von Mises en la cámara térmica alcanza un valor máximo de  $1.81 \times 10^9 \text{ N/m}^2$ , localizado en la placa superior, el cual supera en aproximadamente 6.4 veces el límite elástico del material ( $2.83 \times 10^8 \text{ N/m}^2$ ). El análisis térmico por elemento finito confirma que la cámara térmica presenta un buen aislamiento térmico, con temperaturas exteriores entre 300 y 301.5 K (26.9–28.4 °C) y una distribución interior homogénea en el rango de 299.6 a 300.0 K (26.5–26.9 °C). La diferencia máxima de temperatura entre el interior y el exterior es de aproximadamente 1.5 K, lo que evidencia un desempeño adecuado de los materiales y espesores empleados para minimizar las pérdidas de calor y garantizar la estabilidad térmica del sistema.

Como trabajo a futuro, Se considera indispensable realizar una nueva simulación estructural y térmica, preferentemente mediante un análisis termo-mecánico acoplado considerando toda la estructura de soporte y validando los parámetros de simulación para colocar datos mas asertivos en la simulación reflejando el empleo de materiales con mayor límite elástico y mejor comportamiento a altas temperaturas, dado que se trata de una cámara térmica, donde la resistencia mecánica puede verse reducida por efectos térmicos

## VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] León-Cárdenas, N. V. and Casas-Vela, M. J. (2024). Contaminación ambiental por residuos plásticos: reutilización y educación ambiental. *Mutis*, 14(2), 1-14. <https://doi.org/10.21789/22561498.2056>
- [2] ECOCE. (s.f.). *Recursos: cifras y estadísticas*. <https://ecoce.mx/recursos/>
- [3] Ragaert, K., Delva, L., and V.-Geem, K. (2017). Mechanical and chemical recycling of solid plastic waste. *Waste Management*, 69, 24-58. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2017.07.044>
- [4] Schyns, Z. O. G. and Shaver, M. P. (2021). Mechanical recycling of packaging plastics: a review. *Macromol. Rapid Commun.*, 42, 2000415. [10.1002/marc.202000415](https://doi.org/10.1002/marc.202000415)
- [5] Silva, R. J. D. O., Graf, K., and Leite Ribeiro Okimoto, M. L. (2025). Plastic waste recycling: an overview of the mechanical, chemical, and thermal technologies. *Journal of Engineering and Applied Science*, 72(1), 251. <https://doi.org/10.1186/s44147-025-00799-2>
- [6] Jasso, C. M. M., Wu, J., Torres, S. A. G., Huber, G., and Castillo, M. A. S. (2023). Un enfoque termoquímico para el reciclaje sostenible de residuos plásticos postindustriales. *Tendencias en energías renovables y sustentabilidad*, 2(1), 30-30. <https://aldeser.org/journals/index.php/TERYS/article/view/308/238>
- [7] Delgado-Flores, J. C. (2024). *Manufactura de una máquina extrusora horizontal con energía solar integrada a través de un sistema automático de concentración solar de canal parabólico* [Tesis de Maestría, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga].
- [8] André-Jaime, P. (2023). *Diseño y manufactura de una máquina trituradora de plásticos: metrología y caracterización de materiales* [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga].
- [9] Torres-López, D. A. (2022). *Análisis AMEF y QFD en el diseño y manufactura de un reactor pirolítico de 100 L de capacidad con calentamiento por resistencias eléctricas y cama refractaria móvil* [Tesis de Licenciatura, Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga].
- [10] INEGI. (05/09/2025). *Censos económicos (Ce) 2024*. <https://www.inegi.org.mx/programas/ce/2024/>
- [11] DATOMex. (s.f.). *Directorio de empresas del sector de la manufactura en México*. <https://www.datomex.com/es/directorio-empresas-manufactura-mexico.html>
- [12] Tratamiento Térmico Industrial. (23/04/2014). *Tratamiento térmico: dar vida útil a tus herramientas*. <https://tratamientos-termicos-industrial.webnode.mx/>
- [13] Mier-Simental, D. (2013). *Aplicaciones de la madera en ingeniería y métodos de su preservación* [Tesis de Licenciatura, Instituto Politécnico Nacional]. <https://tesis.ipn.mx/bitstream/handle/123456789/16921/25-1-16554.pdf>
- [14] Aron. (17/01/2026). *How to choose the best heat treatment furnace: a complete buying guide*. Alibaba.com Smart Buy. <https://smartbuy.alibaba.com/buyingguides/heat-treatment-furnace>
- [15] Askeland, D. R. and Wright, W. J. (2017). *Ciencia e ingeniería de los materiales*. (7ª ed.). Cengage Learning.

- [16] *Heat treating*. (2002). In Donachie, M. J. and Donachie, S. J. (Ed.), *Superalloys: a technical guide* (2<sup>nd</sup> ed.) (135-147). ASM International.
- [17] Tratamiento térmico de metales. (2014). En Groover, M. P. (Ed.), *Introducción a los procesos de manufactura*, (1<sup>a</sup> ed.). Mc Graw Hill.
- [18] Air Liquide. (s.f.). *¿Qué es el tratamiento térmico y cuáles son sus objetivos?*. <https://es.airliquide.com/soluciones/tratamiento-termico-de-metales/que-es-el-tratamiento-termico-y-cuales-son-sus-objetivos>
- [19] Deingenierías.com. (25/07/2019). *Tipos de tratamientos térmicos | Temple, normalizado, recocido, revenido y más*. <https://deingenierias.com/el-acero/clasificacion-tratamientos-termicos/>
- [20] Bodycote. (s.f.). *¿Qué hacemos? Tratamiento Térmico de precisión*. <https://www.bodycote.com/es/lo-que-hacemos/tratamiento-termico-de-precision/>
- [21] CENAM. (s.f.). *Definición: Dureza*. <https://www.cenam.mx/FYP/Dureza/Dur1.aspx>
- [22] Metalinspec. (27/06/2019). *¿Cuáles son los diferentes métodos para medir la dureza en los materiales?*. <https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/cuales-son-los-diferentes-metodos-para-medir-la-dureza-en-los-materiales>
- [23] Structuralia. (27/06/2022). *Explicamos en qué consisten los tratamientos térmicos de temple*. <https://blog.structuralia.com/tratamientos-t%C3%A9rmicos-de-temple>
- [24] Stevens, R. (29/08/2024). *Ensayos de dureza de metales: ensayos Rockwell, Brinell, Vickers, Knoop y Leeb. Xometry*. <https://xometry.pro/es/articulos/ensayos-dureza-metales/>
- [25] ZwickRoell. (s.f.). *Ensayo de dureza Rockwell: ISO 6508, ASTM E18*. <https://www.zwickroell.com/es/sectores/metales/normas-para-metales/ensayo-de-dureza-rockwell-iso-6508/>
- [26] Universidad Nacional Autónoma de México. (2024). *Práctica de Dureza. PAPIME-PE102421 - Generación de recursos didácticos que contribuyan a la mejora en la realización de prácticas en formato no presencial y mixto del área de Ciencia e Ingeniería de Materiales*. <https://unita.unam.mx/wp-content/uploads/2024/11/dureza-102421.pdf>
- [27] Air Liquide. (s.f.). *Hornos de tratamiento térmico*. <https://es.airliquide.com/soluciones/tratamiento-termico-de-metales/hornos-de-tratamiento-termico>
- [28] Powdertronic. (20/07/2017). *Tipos de horno industrial para tratamiento térmico*. <https://powdertronic.com/tipos-de-horno-industrial-para-tratamiento-termico/>
- [29] Totten, G. E. (2006). *Steel Heat Treatment: Metallurgy and Technologies* (2nd ed.). CRC Press.
- [30] Herring, D. H. (2015). *Atmosphere Heat Treatment, Volume I*. BNP Media.
- [31] Kintek. (s.f.). *¿Cuáles son los componentes principales de un horno de laboratorio? Partes esenciales para un procesamiento preciso a alta temperatura*. <https://es.kintekfurnace.com/faqs/what-are-the-main-components-of-a-laboratory->

- furnace#:~:text=En%20esencia%2C%20un%20horno%20de%20laboratorio%20consta,partes%20trabajan%20al%20un%C3%ADsono%20para%20crear%20un
- [32] Chandler, H. (1995). *Heat Treater's Guide: Practices and Procedures for Irons and Steels* (2nd ed.). ASM International.
- [33] TeficBio. (s.f.). *Horno de mufla de tratamiento térmico*. <http://www.teficbio.com/high-temperature-muffle-furnace/heat-treatment-muffle-furnace/box-type-electric-muffle-furnace-manufacturer.html>
- [34] Dossett, J. L. and Totten, G. E. (Eds.). (2013). *ASM Handbook, Volume 4A: Steel heat treating fundamentals and processes*. ASM International.
- [35] Totten, G. E. (Ed.). (2006). *Steel heat treatment: Equipment and process design* (2nd ed.). CRC Press.
- [36] Krauss, G. (2015). *Steels: Processing, structure, and performance* (2nd ed.). ASM International.
- [37] Crystec Technology. (s.f.). *Tratamiento térmico del acero*. <https://www.crystec.com/klthstz.htm>
- [38] Rojas-Triana, Y. D. (07/09/2015). *Como hacer una Mufla?*. <http://yeisonrojasietim.blogspot.com/2015/09/como-hacer-una-mufla-gas.html>
- [39] CEIV. (s.f.). *Mufla de Laboratorio*. <https://ceiv.com.mx/mufla-de-laboratorio/>
- [40] Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., and Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- [41] Schacht, C. (2004). *Refractories handbook*. CRC Press.
- [42] Julio Martínez Naya SA. (s.f.). *Resistencias de filamento de Niquel/Cromo*. <https://juliomartineznaya.com/resistencias-de-filamento-de-niquel-cromo/>
- [43] Sadler, B. A., & Wang, W. (2016). Industrial electric heating: Principles and applications. In *Energy Management and Efficiency for the Process Industries*. Wiley-AIChE.
- [44] Lidefer. (s.f.). *Materiales refractarios*. <https://www.lifeder.com/materiales-refractarios/>
- [45] Childs, P. R. N. (2001). *Practical temperature measurement*. Butterworth-Heinemann.
- [46] Alvecar-Lamar, B. A. (2024). *Diseño y construcción de un horno eléctrico de tratamientos térmicos para el laboratorio industrial de la universidad técnica estatal de Quevedo* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica Estatal de Quevedo]. <https://repositorio.uteq.edu.ec/items/4d7bd7c3-da57-4308-877c-d40bffc2c4cb>
- [47] Ruiz-Ruiz, S. E. and Suárez Terán, D. L. (2025). *Diseño y construcción de un horno de tratamientos térmicos superficiales con control electrónico* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/bitstream/123456789/17190/2/04%20AUT%20068%20TRABAJO%20GRADO.pdf>
- [48] Monteros-Vizcaíno, L. A. (2015). *Diseño y construcción de un horno mufla para la realización de tratamientos térmicos en aceros* [Tesis de Licenciatura, Universidad Técnica del Norte]. <https://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/4592>

- [49] Jaramillo-Carrasco, P. I. and Peralta-Rubio, P. A. (2022). *Diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa Fibroacero SA* [Tesis de Licenciatura, Universidad Politécnica Salesiana]. <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23553/1/UPS-CT010127.pdf>
- [50] Anaidhuno, U. P. and Ologe S. O. (2024). Design and construction of an electric heat treatment furnace using locally sourced materials. *W. J. Adv. Res. Rev.*, 22(02), 175-184. <https://doi.org/10.30574/wjarr.2024.22.2.1196>
- [51] Major, P. and Solomon I. (2023). Design and construction of heat treatment furnace using ant hill. *Innov. Sys. Des. Res.*, 13(01), 31-35. <https://www.iiste.org/Journals/index.php/ISDE/article/download/60596/62553>
- [52] Duarte-Barrero, D. F. and Vargas-Alvarez, J. D. (2018). *Diseño de horno eléctrico para tratamientos térmicos con atmosfera controlada* [Tesis de Licenciatura, Fundación Universitaria Los Libertadores]. <https://repository.libertadores.edu.co/server/api/core/bitstreams/5cace05e-bc78-4922-9e2c-9291aef03c76/content>

## ANEXO 1

### Empresas o talleres nacionales dedicadas al servicio de tratamiento térmico industrial

**Tabla AT1.** Listado de empresas o talleres con servicios de tratamiento térmico.

EMPRESA	PÁGINA WEB	DOMICILIO	TELÉFONO	PROCESOS OFRECIDOS
Tratamientos Térmicos de Querétaro, S.A. de C.V.	—	Querétaro, Qro., México	—	Temple, revenido, normalizado, alivio de esfuerzos
Durez Aplicada   Tratamientos Térmicos	<a href="https://www.durezaplicada.com.mx/">https://www.durezaplicada.com.mx/</a>	Av. Perillillar 19, Amp. Progreso Nacional, CDMX	(55) 5392-1521	Temple, revenido, cementación, nitruración, carbonitruración
Tratamientos Térmicos Emisa	—	CDMX, México	—	Temple, revenido, normalizado, recocido
Tratamientos Térmicos Omega	<a href="https://www.tratamientosomega.com.mx/">https://www.tratamientosomega.com.mx/</a>	Monterrey, N.L., México	—	Temple, revenido, cementación, alivio de esfuerzos
TRATERM. S.A. de C.V.	<a href="https://traterm.com.mx/">https://traterm.com.mx/</a>	Ecatepec de Morelos, Méx., México	(55) 5699-8099	Temple, revenido, carburizado, nitruración, recocido
Tratamientos Térmicos Industrial	<a href="https://tratamientos-termicos-industrial.webnode.mx/">https://tratamientos-termicos-industrial.webnode.mx/</a>	Puebla, Pue., México	(222)2489746	Temple, revenido, normalizado
Tecnología en Tratamiento Térmicos S.A. de C.V.	—	Nuevo León, México	—	Temple, revenido, cementación (industrial)
Tratamientos Térmicos y Estructuras S.A. de C.V.	—	Monterrey, N.L., México	—	Temple, alivio de esfuerzos, normalizado
Tratamientos Térmicos Avanzados S.A. de C.V.	<a href="https://www.ttavanzados.com/">https://www.ttavanzados.com/</a>	Monterrey, N.L., México	—	Temple en atmósfera controlada, nitruración, carburizado
Especialidades Térmicas	<a href="https://especialidadestermicas.com/">https://especialidadestermicas.com/</a>	Cuautitlán Izcalli, Méx., México	—	Temple, revenido, recocido, normalizado
Tratamientos Térmicos Termetal	—	San Pablo Autopan, Méx., México	—	Temple, revenido
METREMEX – Tratamientos Térmicos	<a href="https://www.metremex.com/">https://www.metremex.com/</a>	Tlalnepantla, Méx., México	(55) 5715-4620	Temple, carburizado, nitruración, revenido

**Tabla AT1.** Continuación.

EMPRESA	PÁGINA WEB	DOMICILIO	TELÉFONO	PROCESOS OFRECIDOS
Templados y Rectificados, S.A. de C.V.	—	Monterrey, N.L., México	—	Temple, revenido, rectificado posterior
Tratamientos Térmicos (Guadalajara)	—	Guadalajara, Jal., México	—	Temple, normalizado, alivio de esfuerzos
Tratamientos Térmicos de Toluca	—	Toluca, Méx., México	—	Temple, revenido, recocido
Servicios Térmicos Galván	—	Guadalajara, Jal., México	—	Temple, revenido, cementación
Tratamiento Térmico (taller)	—	Cuautitlán Izcalli, Méx., México	—	Temple y revenido (taller)
Transformaciones Térmicas y Metálicas “TTYM”	—	Xonacatlán, Méx., México	—	Temple, revenido, procesos básicos
ALD Tratamientos Térmicos	<a href="https://www.he-at-treatment-services.com/">https://www.he-at-treatment-services.com/</a>	Ramos Arizpe, Coah., México	(844) 277-2257	Temple al vacío, LPC (carburizado a baja presión), nitruración, revenido
HT-MX Tratamientos Secundarios	<a href="https://www.htmx.com/">https://www.htmx.com/</a>	Chihuahua, Chih., México	(614) 492-3800	Temple, carburizado, HIPing, análisis metalográfico
Termitec, S.A. de C.V.	<a href="https://en.termitec.com.mx/">https://en.termitec.com.mx/</a>	CDMX y Puebla, México	(55) 9173-0159	Nitruración en sales, austempering, carburizado
Acerurgia	<a href="https://acerurgia.com.mx/">https://acerurgia.com.mx/</a>	San Luis Potosí, S.L.P., México	(444) 821-3808	Tratamiento térmico de aceros, temple, revenido, normalizado
DOWA Thermotech Mexico, S.A. de C.V.	<a href="https://dowa-tht.mx/">https://dowa-tht.mx/</a>	Villa de Reyes, S.L.P., México	(444) 478-2000	Nitruración, carburizado, temple en atmósfera controlada

## ANEXO 2

### Acceso universal al conocimiento: difusión y divulgación científica

El prototipo se sometió al certamen de proyectos en la Cumbre Nacional de Desarrollo Tecnológico, Emprendimiento e Innovación, InnovaTecNM 2025.



Figura AF1. Constancia fase local, InnovaTecNM 2025.



**Educación**  
Secretaría de Educación Pública



TECNOLÓGICO  
NACIONAL DE MÉXICO

**EL TECNOLÓGICO NACIONAL DE MÉXICO  
A TRAVÉS DEL INSTITUTO TECNOLÓGICO DE AGUASCALIENTES**

OTORGA LA PRESENTE

**CONSTANCIA**

A

**ERIK JOSE MARTINEZ VITAL**

POR SU DESTACADA PARTICIPACIÓN PRESENTANDO EL PROYECTO  
**TERMOPRO**, DE LA **CATEGORÍA INDUSTRIA ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**  
EN EL CERTAMEN DE PROYECTOS [NIVEL LICENCIATURA], DE LA  
**CUMBRE NACIONAL DE DESARROLLO TECNOLÓGICO, EMPRENDIMIENTO E INNOVACIÓN,  
INNOVATECNM 2025**  
**ETAPA REGIONAL, REGIÓN 3**

CELEBRADO DEL 23 AL 26 DE SEPTIEMBRE  
**AGUASCALIENTES, AGUASCALIENTES A 26 DE SEPTIEMBRE DE 2025**



MARCO ANTONIO  
TRUJILLO MARTÍNEZ  
**DIRECTOR DE VINCULACIÓN  
E INTERCAMBIO ACADÉMICO**



JOSE LUIS  
GIL VÁZQUEZ  
**DIRECTOR DEL  
IT DE AGUASCALIENTES**



Figura AF2. Constancia fase regional, InnovaTecNM 2025.