



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para
Aplicaciones Metal-Mecánicas”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Mark Antony Muñoz Flores

TUTORES:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Pabellón de Arteaga, Ags., febrero del 2026



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO
de Pabellón de Arteaga

INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“MANUFACTURA DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO
PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS”**

Presenta:

Mark Antony Muñoz Flores

Dirigida por:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Pabellón de Arteaga, Ags., febrero del 2026

AGRADECIMIENTOS

Primeramente, quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de poder estudiar y por acompañarme en cada proceso de mi carrera, cuidando mi camino y permitiéndome conocer y aprender mientras disfrutaba este proceso con tranquilidad. Esta experiencia me enseñó que, entre más difícil, más bueno el trofeo, frase que resume el esfuerzo, la constancia y el aprendizaje adquiridos a lo largo de este camino.

También quiero agradecer profundamente a mis padres, Juan Antonio y Sara Angélica, por su apoyo, comprensión incondicional y desinteresada. Gracias por esforzarse y cuidar que no me faltara nada para sobrellevar este proceso; por las palabras de apoyo, las noches en vela y los días difíciles en los que siempre estuvieron ahí. Gracias por preocuparse siempre por mí, por mi tranquilidad, mi felicidad, y por darle valor a mi palabra. A ellos les debo todo. Asimismo, agradezco a toda mi familia por la confianza depositada en mí y por ayudarme a sobrellevar este proceso. De igual manera, agradezco a mis familiares que ya no están con nosotros; gracias por su confianza y por compartir conmigo este logro.

Quiero agradecer al Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga por permitirme estudiar y por el apoyo brindado para sobrellevar este proceso, así como por los recursos que nos proporcionaron para poder trabajar y adquirir valiosas experiencias académicas y formativas.

Agradezco a todos y cada uno de mis docentes y al personal de la institución por tomarse el tiempo y mostrar la dedicación de inculcar conocimiento con respeto y sin interés alguno. Gracias a ellos, que supieron entender y comprender mi persona, permitiéndome aprender a mi propio modo. Gracias por no ser simplemente docentes, sino por permitirme encontrar en ustedes a personas que, tanto dentro de la escuela como en ámbitos extracurriculares, supieron brindarme apoyo y cercanía.

Quiero agradecer a todos mis compañeros y compañeras, así como a las personas que estudiaron en mi generación en esta institución, ya que gracias a ellos no solo pude adquirir conocimientos y habilidades académicas, sino que también aprendí demasiado de cada uno y viví experiencias que me regalaron momentos inolvidables. Gracias por estar en todo momento y apoyarme desinteresadamente. Agradezco también a las personas que, sin darse cuenta, fueron mi motivación para seguir en este proceso, llenando mis días de impulso y de nuevas e impredecibles sorpresas; siempre tendrán un lugar muy especial en mi persona.

Finalmente, agradezco a las personas de mi contexto social y laboral, ya que gracias a ellos pude motivarme, pues confiaron en mí brindándome oportunidades y fortaleciendo en mí sentimientos de superación.

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 **“MANUFACTURA DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS”** del estudiante **MARK ANTONY MUÑOZ FLORES** con número de control 211050160 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®



II. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DR. ENRIQUE JAVIER MARTÍNEZ DELGADO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

Pabellón de Arteaga, Ags.,

08/enero/2026

MARK ANTONY MUÑOZ FLORES
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL 211050160

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: **"MANUFACTURA DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS"**, 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

“MANUFACTURA DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS”

Por: **MARK ANTONY MUÑOZ FLORES**

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 m³ 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 manufactura centrada en la construcción de: (a) una estructura de soporte bajo una configuración geométrica tipo caja, (b) la cámara térmica revestida con aislante térmico y con el sistema de calentamiento integrado y (c) recubrimiento externo de seguridad.

Dirigido por:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

Dr. José Alonso Dena Aguilar

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	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
II. MARCO TEÓRICO	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
III. METODOLOGÍA	27
3.1 DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO.....	27
3.2 CONSTRUCCIÓN DEL HORNO	28
3.3 LISTADO DE MATERIALES, CUANTIFICACIÓN Y PRESUPUESTACIÓN.....	30
3.4 PRUEBAS PRELIMINARES CALENTAMIENTO TÉRMICO.....	31
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	32

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

	Pág.
4.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO.....	32
4.2 MANUFACTURA DEL PROTOTIPO.....	35
4.2.1 Módulo de estructura de soporte.....	35
4.2.2 Módulo de recubrimiento externo de seguridad.....	37
4.2.3 Módulo de la cámara térmica.....	40
4.2.4 Acabado final del horno.....	51
4.3 PRUEBAS DE CALENTAMIENTO.....	54
V. CONCLUSIONES.....	56
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	57
ANEXO 1. Empresas o talleres nacionales dedicadas al servicio de tratamiento térmico industrial.....	60
ANEXO 2. Supuesto de estimación del costo total del horno de tratamiento térmico.....	62
ANEXO 3. Acceso universal al conocimiento: difusión y divulgación científica.....	63

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 Diseño mecánico en vista isométrica del horno de tratamiento térmico de trabajo.....	27
12 Máquina cortadora de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400.....	28
13 Taladro de banco universal.....	29
14 Máquina soldadora de micro alambre marca LINCOLN ELECTRIC.....	29
15 Calentamiento de la cámara térmica durante la puesta en operación del horno construido.....	31
16 Ladrillo refractario M-25 (primera capa).....	32
17 Ladrillo refractario K32 (segunda capa).....	32
18 Saco de mortero (izq.) y preparación de la pasta refractaria con agua (der.).....	33
19 Conjunto de placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas y gabinete de termopar sensor alámbrico.....	33
20 Aspecto de la placa de fibra cerámica con resistencia eléctrica.....	34
21 Aspecto del piso cerámico de capa aislante primaria.....	34
22 Actividades de corte de piezas (izq.) y esmerilado de secciones de la estructura (der.).....	35
23 Armado inicial de la estructura de soporte con geometría tipo caja.....	36
24 Vista de la estructura de soporte concluida.....	36
25 Vista del módulo de recubrimiento externo de seguridad a base de placa de acero unidas a la estructura.....	37
26 Esmerilado de puntos de soldadura del módulo de recubrimiento externo de seguridad.....	38
27 Vista del acabado final interno del módulo de recubrimiento externo de seguridad.....	38
28 Vista del acabado final externo del módulo de recubrimiento externo de seguridad.....	39

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

	Pág.	
29	Presentación del piso cerámico en la cámara.....	39
30	Recubrimiento del piso y paredes interiores con piso cerámico.....	41
31	Recubrimiento parcial de paredes con ladrillo refractario M-25.....	42
32	Colocación completa del ladrillo refractario M-25.....	42
33	Recubrimiento inicial de paredes con ladrillo refractario K32.....	43
34	Colocación de placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas.....	43
35	Construcción inicial de la cúpula.....	44
36	Primera capa de nivelación con mortero sobre la cúpula.....	44
37	Segunda capa de mortero con malla de metal desplegado sobre la cúpula.....	45
38	Última capa recubriendo con piso cerámico y afinando detalles con mortero.....	45
39	Vista de la cúpula concluida.....	46
40	Cobertura de los espacios de la cúpula.....	46
41	Construcción del marco de la puerta.....	47
42	Sistema de bisagra: soporte creado para bisagra en parte inferior de la estructura.....	47
43	Sistema de bisagra: base giratoria para estructura de refuerzo de la puerta.....	48
44	Estructura de la puerta con placa y refuerzos ya soldados.....	48
45	Vista de la puerta completamente ensamblada.....	49
46	Puerta con recubrimiento de ladrillos.....	49
47	Sello de la puerta para ajuste de cierre hermético del equipo.....	50
48	Sistema de cierre del horno.....	50
49	Vista frontal del horno de tratamiento térmico concluido.....	51
50	Vista lateral del horno de tratamiento térmico concluido.....	52
51	Vista de la cámara térmica del horno de tratamiento térmico concluido.....	53
52	Vista completa del interior horno de tratamiento térmico concluido.....	54
53	Curva térmica de calentamiento para 1200 °C.....	55
AF1	Constancia fase local, InnovaTecNM 2025.....	60
AF2	Constancia fase regional, InnovaTecNM 2025.....	61

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
1	Componentes y materiales del horno de tratamiento térmico.....	30
AT1	Listado de empresas o talleres con servicios de tratamiento térmico.....	60
AT2	Estimación del costo total del horno de tratamiento térmico.....	62

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.

Ingeniería Mecatrónica

Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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 manufactura centrada en la construcción de: (a) una estructura de soporte bajo una configuración geométrica cuadrada, (b) la cámara de calentamiento (en adelante, cámara térmica) revestida con aislante térmico y con el sistema de calentamiento integrado y (c) recubrimiento externo de seguridad.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Construir un prototipo de horno de tratamiento térmico hecho a la medida mediante técnicas de manufactura y mampostería refractaria para su puesta en operación bajo condiciones sin carga.

1.2.2 Objetivos específicos

- Revisar y aplicar los diseños mecánicos del prototipo previamente elaborados mediante el uso de software de diseño especializado como base para su construcción.
- Seleccionar y dimensionar los materiales de construcción del prototipo con base a una revisión de la literatura técnica especializada.
- Manufacturar e integrar los componentes del horno mediante técnicas de manufactura y mampostería refractaria para conformar el prototipo funcional.
- Poner en operación el prototipo mediante pruebas exploratorias de calentamiento con el fin de evaluar su desempeño térmico e identificar posibles acciones de reingeniería y mejora.

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 prototipo de horno de tratamiento térmico construido alcanzará y mantendrá el calentamiento de la cámara térmica durante su puesta en operación sin carga.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

- Únicamente se manufacturará un solo tipo de modelo de horno de tratamiento térmico.
- Simples pruebas de calentamiento serán realizadas como medio de comprobación operativa del prototipo.
- En base a las pruebas simples de calentamiento se podrán detectar acciones de reingeniería, pero únicamente serán registradas.
- Ninguna acción de reingeniería será aplicada por lo que está fuera de alcance la optimización del equipo.
- 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

Ingeniería Mecatrónica

Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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.

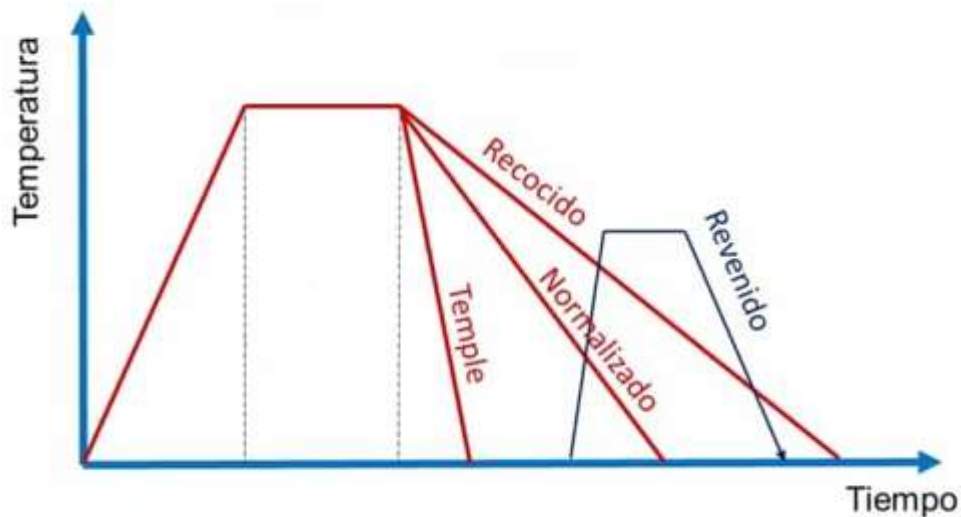


Figura 1. Tipos de tratamientos térmicos [19].

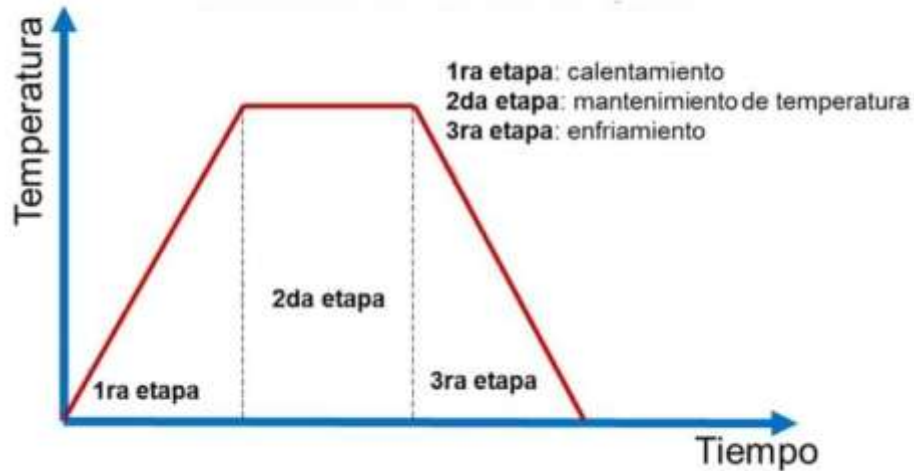


Figura 2. Tratamiento térmico de temple [19].

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° , 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].

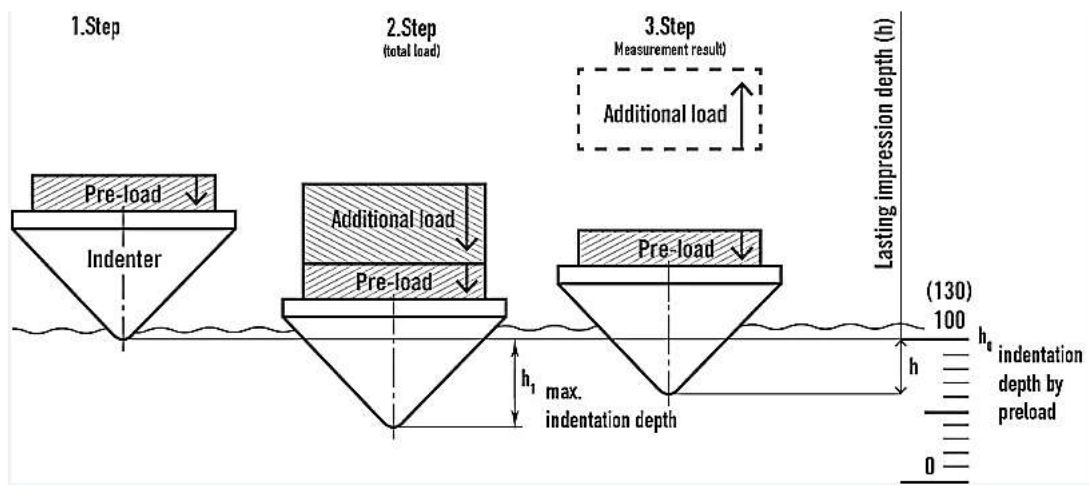


Figura 4. Procedimiento de tres pasos del ensayo de dureza Rockwell, mostrando la aplicación de pre-carga, carga total y medición de la profundidad de indentación permanente [25].

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 (σ_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 (σ_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

Ingeniería Mecatrónica

Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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].

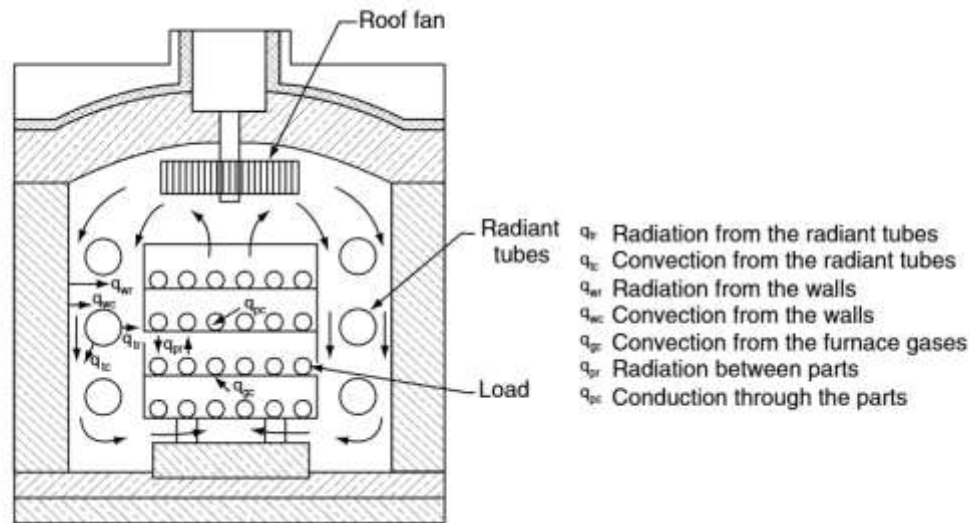


Figura 5. Horno de tratamiento térmico con atmósfera controlada [29].

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.

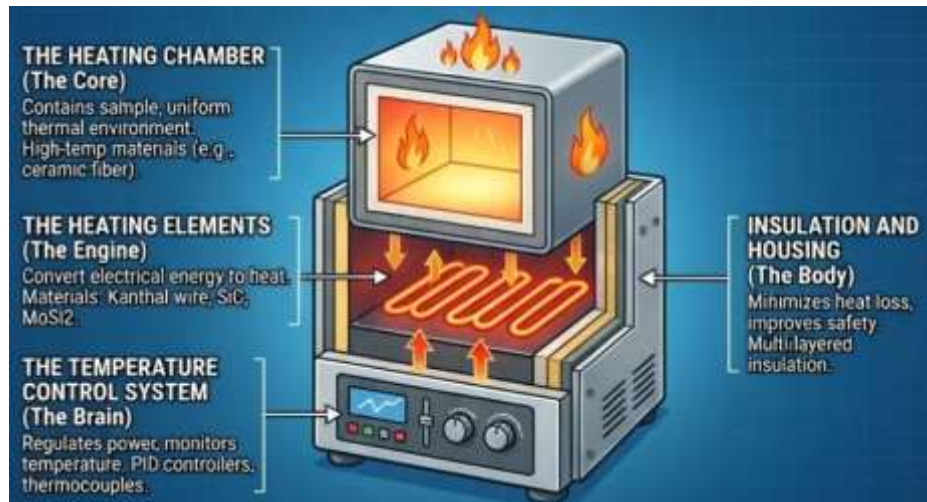


Figura 6. Diagrama esquemático de los componentes principales de un horno de tratamiento térmico [31].

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.

Ingeniería Mecatrónica

Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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.

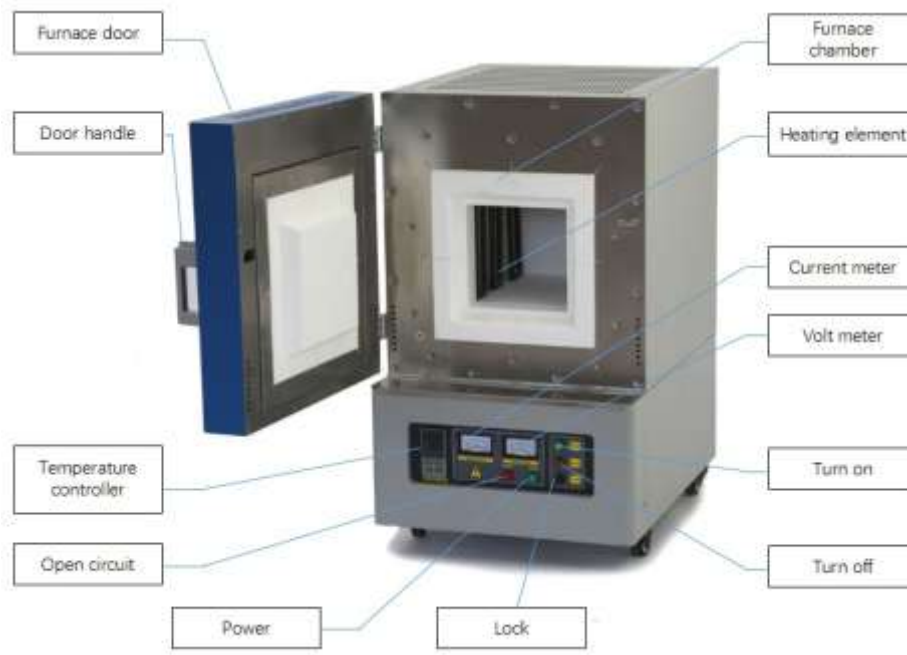


Figura 7. Horno de tratamiento térmico tipo mufla mostrando sus componentes principales [33].

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.

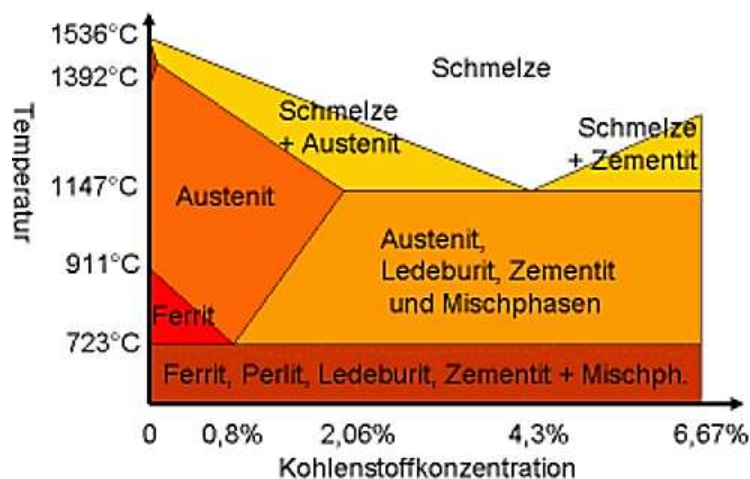


Figura 8. Diagrama de fases Fe-C [37].

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.

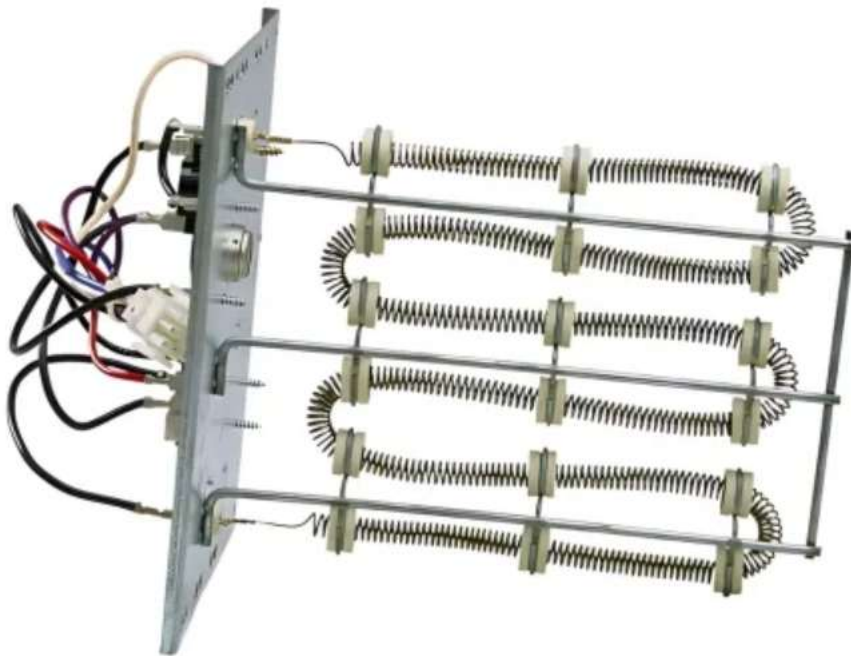


Figura 9. Resistencias eléctricas en espiral de aleación Níquel-Cromo [42].

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 manufactura realizadas para la construcción del horno de tratamiento térmico.

3.1 DISEÑO MECÁNICO DEL EQUIPO

La construcción del horno de tratamiento térmico fue realizado conforme el diseño mecánico obtenido en un trabajo previo (no presentado) y en el que se han definido y validado las dimensiones, los materiales y el funcionamiento del sistema. A manera de ejemplo, en la Figura 11, se presenta un diseño mecánico en vista isométrica del horno propuesto. La configuración arquitectónica del horno de tratamiento térmico se basó en una configuración geométrica tipo caja con una cámara de calentamiento (en adelante cámara térmica) sin atmosfera controlada, revestida de ladrillo refractario en sus paredes y piso, con un techo en forma de cúpula provista con una abertura de gases de salida, empleando resistencias eléctricas como la fuente de calor de trabajo y una puerta de cierre hermético. Por derechos de propiedad industrial y patentado, las dimensiones específicas del prototipo no son presentadas en el presente trabajo.

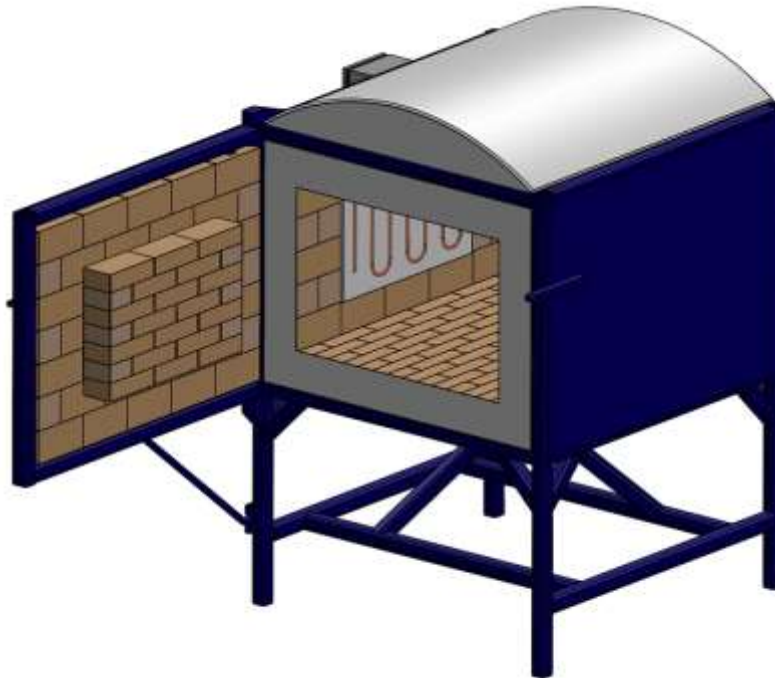


Figura 11. Diseño mecánico en vista isométrica del horno de tratamiento térmico de trabajo.

3.2 CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

La manufactura del horno de tratamiento térmico se llevó a cabo en las instalaciones del taller de manufactura y del área gris de la institución sede, empleando:

- (a) Técnicas de manufactura CNC para acciones de corte de lámina de acero empleando una cortadora de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400, ver Figura 12.
- (b) Técnicas convencionales de manufactura a través de operaciones manuales usando máquinas y herramientas mecánicas de fabricación estructural de corte, cizallado, perforación, desbaste, entre otros. Entre las maquinas empleados se empleó un taladro de banco universal (ver Figura 13), una máquina soldadora de micro alambre marca LINCOLN ELECTRIC (ver Figura 14), sierra cinta horizontal universal, entre otras.
- (c) Técnicas de mampostería refractaria ejecutadas mediante operaciones manuales con el uso de herramientas básicas de albañilería.

La manufactura del horno se centró en el desarrollo de los siguientes módulos de operación:

- 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 12. Máquina cortadora de plasma LINCOLN ELECTRIC 4400.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 13. Taladro de banco universal.



Figura 14. Máquina soldadora de micro alambre marca LINCOLN ELECTRIC.

3.3 LISTADO DE MATERIALES, CUANTIFICACIÓN Y PRESUPUESTACIÓN

El material empleado para la manufactura de los módulos de operación del horno de tratamiento térmico se presenta en la Tabla 1. Los materiales empleados fueron de fácil adquisición, pero de resistencia comprobada, de acero al carbón comercial, ladrillo y mortero refractario, elementos de calefacción (resistencias eléctricas), entre otros. Los insumos se obtuvieron de centros especializados de distribución de materiales en acero, refractarios, fabricación de resistencias eléctricas industriales, entre otros. Adicionalmente en la Tabla 1, y a manera de referencia, se describe la cuantificación y presupuestación de los materiales empleados en la fabricación del horno (precios aproximados en moneda nacional). Se considera la integración del sistema de control de temperatura (no presentado). Ningún estudio de rentabilidad fue realizado. Tampoco se consideró el cálculo de los costos por mano de obra, envío e impuestos aplicables.

Tabla 1. Componentes y materiales del horno de tratamiento térmico.

MÓDULO	MATERIAL	CANTIDAD	MONTO	OBSERVACIONES
Estructura de soporte	Perfil PTR 2×2" cal. 14	25 m	\$3,541.66	Tramo de 6 m costo unitario de \$850.00
Cámara térmica	Ladrillo refractario M-25 kg/cm ² med 9×4" 1/2×2 1/2"	325 pzas	\$27,446.25	Costo unitario del ladrillo \$84.45 *primera capa refractaria (base)
	Ladrillo refractario K32 med 9×4" 1/2×2 1/2"	140 pzas.	\$4,666.20	Costo unitario del ladrillo \$33.33 *segunda capa refractaria (aislante inicial)
	Mortero refractario corcarolli 1200 °C	13 pzas.	\$11,000.00	Saco de 25 kg
	Placa de fibra cerámica con resistencias eléctricas 2" 4000W 220V 40×60 cm	3 pzas.	\$38,976.00	
	Bisagras con eje de giro tubular	2 pzas.	\$450.00	
	Cerrojo	1 pza.	\$230.00	Tipo perno deslizante
Recubrimiento externo de seguridad	Lamina de acero 3'×10' cal 14	1 unidad	\$7,141.56	Costo de 1 lámina de 2.76 m ² = \$3,422.00 5.76 m ² de lámina empleada
	Piso cerámico estándar med. 40×40 cm	1 unidad	\$1,360.80	Costo de 1 caja de 1.6 m ² = \$302.40 7.2 m ² de piso empleado *Capa aislante primaria
	Termopar sensor alámbrico tipo k 1000-1300 °C de temperatura con pantalla LCD	1 pza.	\$12,180.00	Sistema de control de temperatura
TOTAL			\$106,992.47	Costo neto

3.4 PRUEBAS PRELIMINARES CALENTAMIENTO TÉRMICO

Pruebas simples de calentamiento sin carga y bajo ningún diseño experimental, fueron realizadas colocando el horno de tratamiento térmico en funcionamiento a una potencia de 1200 °C con el objetivo de únicamente detectar el correcto funcionamiento de:

1. El confinamiento del calor en la cámara térmica producido por las resistencias eléctricas, ver Figura 15.
2. El cierre hermético del sistema para validar la ausencia de fugas de calor y en su caso proponer acciones de reingeniería.

Únicamente se registró el tiempo en que tardó el horno en llegar a la temperatura de estudio y se valoró el correcto funcionamiento del confinamiento de calor y cierre hermético.

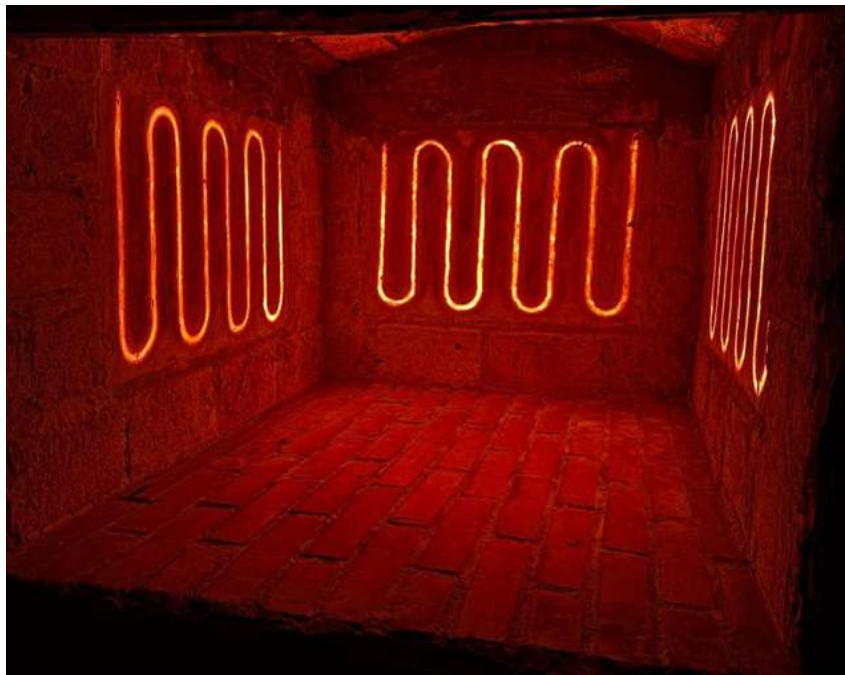


Figura 15. Calentamiento de la cámara térmica durante la puesta en operación del horno construido.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se detallan los logros alcanzados en la construcción y ensamblaje del horno de tratamiento térmico.

4.1 MATERIALES DE CONSTRUCCIÓN DEL HORNO

De las Figuras 16 a la 21, se muestran algunos materiales empleados en la construcción del equipo.



Figura 16. Ladrillo refractario M-25 (primera capa).



Figura 17. Ladrillo refractario K32 (segunda capa).

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 18. Saco de mortero (izq.) y preparación de la pasta refractaria con agua (der.).



Figura 19. Conjunto de placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas y gabinete de termopar sensor alámbrico.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 20. Aspecto de la placa de fibra cerámica con resistencia eléctrica.



Figura 21. Aspecto del piso cerámico de capa aislante primaria.

4.2 MANUFACTURA DEL PROTOTIPO

Aplicando las diversas técnicas de manufactura y mampostería refractaria seleccionadas, se logró la construcción del prototipo de horno. La validación del equipo se estableció en el comportamiento térmico del equipo bajo lo siguiente:

- a. Estabilidad de la estructura de soporte.
- b. Integración de todos los componentes.
- c. Libre de desprendimiento de la arquitectura refractaria.
- d. Correcto cierre hermético del equipo.
- e. Capacidad de calentamiento y confinamiento del calor en la cámara térmica.
- f. Ausencias de fugas de calor.
- g. Funcionamiento de las resistencias eléctricas.

4.2.1 Módulo de estructura de soporte

Este módulo cumple la función principal de dar el soporte y fijación de la cámara térmica. La estructura de soporte del horno se conformó bajo una configuración geométrica tipo caja a base de herrería con dimensiones suficientes para el montaje de los demás módulos del equipo. La estructura contó con dimensiones totales de 1100×1085×1595 mm con espacio suficiente para el montaje de la cámara térmica de 0.52 m³ de capacidad. La estructura mantuvo la cámara a desnivel para facilitar tanto el transporte del equipo mediante el uso de montacargas y como la operación del equipo por parte del usuario. Antes de la puesta del piso cerámico se aplicó un acabado final anti corrosivo en color azul esmalte. En las Figuras 22 a la 24, se observan fases de la construcción de este módulo.

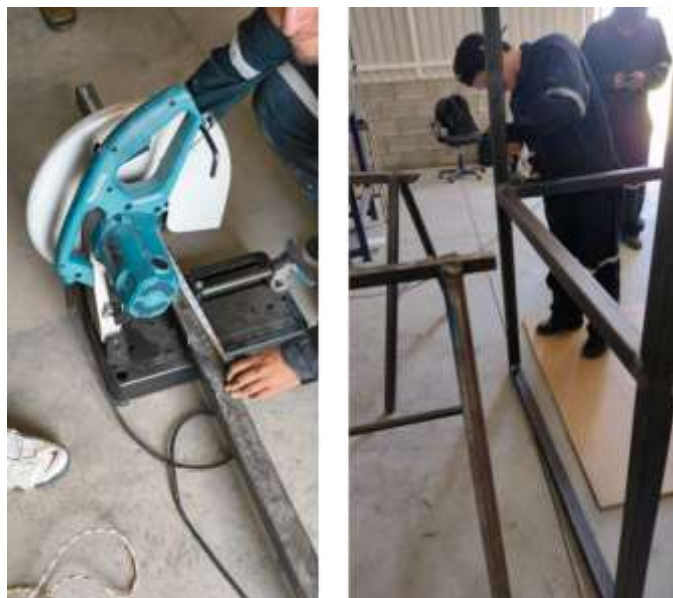


Figura 22. Actividades de corte de piezas (izq.) y esmerilado de secciones de la estructura (der.).

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 23. Armado inicial de la estructura de soporte con geometría tipo caja.



Figura 24. Vista de la estructura de soporte concluida.

4.2.2 Módulo de recubrimiento externo de seguridad

Este módulo cumple la función de mantener la superficie exterior a una temperatura segura para el usuario mientras el equipo está en funcionamiento. El módulo se conformó a base de un revestimiento de lámina de acero del área de la cámara térmica de la estructura de soporte. Se instaló lámina en la cara inferior, posterior, lateral izquierda y lateral derecha de la cámara. Así mismo, el módulo incluyó una cobertura a pase de piso cerámico sobre la lámina de acero. Ambos componentes, actúan como la capa final de protección térmica de seguridad para el usuario. Las pruebas experimentales desarrolladas registraron temperaturas máximas en el exterior de 35 °C. Antes de la puesta del piso cerámico se aplicó un acabado final anti corrosivo en color azul esmalte. De las Figuras 25 a la 29, se presentan evidencias del desarrollo de este módulo.



Figura 25. Vista del módulo de recubrimiento externo de seguridad a base de placa de acero unidas a la estructura.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 26. Esmerilado de puntos de soldadura del módulo de recubrimiento externo de seguridad.



Figura 27. Vista del acabado final interno del módulo de recubrimiento externo de seguridad.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 28. Vista del acabado final externo del módulo de recubrimiento externo de seguridad



Figura 29. Presentación del piso cerámico en la cámara.

4.2.3 Módulo de la cámara térmica

Dado que la estructura de soporte fue construida bajo una arquitectura tipo caja, la cámara térmica se configuró de igual manera, considerando que:

1. Se utilizaron técnicas de mampostería refractaria para la conformación de la cámara.
2. El mortero refractario sirvió como el pegamento especial resistente al fuego para unir las piezas de piso cerámico y de ladrillo refractario. Para cada etapa de construcción con mortero, se dejó hasta 48 horas de secado para asegurar un buen endurecimiento del mortero y estabilidad de las piezas unidas.
3. Primeramente, la cara inferior, lateral izquierda, lateral derecha y posterior fueron cubiertos con piso cerámico a manera de capa aislante primaria, ver Figura 30.
4. Enseguida, en las mismas caras, se colocó una primera capa refractaria como base empleando el ladrillo refractario M-25, ver Figuras 31 y 32. El acomodo de los ladrillos fue considerando una arquitectura de aparejo traslapando los ladrillos evitando juntas verticales continuas.
5. Luego, en las caras lateral izquierda, lateral derecha y posterior, se colocó una segunda capa refractaria (aislante inicial) usando los ladrillos refractarios K32, ver Figura 33. La colocación de los ladrillos también fue bajo técnica de aparejo dejando un vano (espacio) hueco para la colocación y empotre de las placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas.
6. Posteriormente, se empotraron las placas de fibra cerámica en el vano manteniendo libre las puntas de las resistencias eléctricas para su conectividad en el sistema eléctrico de potencia, ver Figura 34.
7. A continuación, se elaboró la techumbre de la cámara de tipo cúpula. Para otorgar la forma de arco del techo se empleó un armazón metálico a base de soportes de solera, las cuales actuaron como vigas, ver Figura 35. En cada viga se colocaron hiladas de ladrillos refractarios K32 y se colocó una primera cubierta (capa) de mortero, ver Figura 36. Seguidamente se colocó una malla metálica como refuerzo y se aplicó simultáneamente una segunda cubierta (capa) de mortero y pedacería de piso cerámico como cubierta adicional, ver Figuras de la 37 a la 39. Finalmente, los espacios vacíos del sobresaliente de la cúpula –con respecto a la estructura metálica– tanto en la parte frontal como en la parte posterior fueron cubiertos aplicando una capa de mortero y ladrillo refractario K32 para garantizar el correcto aislamiento y cierre hermético del horno, ver Figura 40. En todo momento se aseguró que los cables de conexión eléctrica de potencia de las placas de fibra cerámica sobresalieran de la cúpula y estuvieran aislados por temas de seguridad eléctrica.
8. Finalmente, se elaboró la puerta del horno. En primer término, se creó la puerta a base de perfil PTR, tubular como eje de giro y lamina de acero para conformar una puerta rectangular acorde a las medidas de la cámara térmica, ver Figura 41. En segundo término, se adaptó un sistema de bisagra como medio de giro con refuerzos estructurales para el soporte del peso y el giro estable de la puerta, ver Figuras 42 y 43. Posterior, se aplicó un recubrimiento anticorrosivo azul esmalte y uno térmico a base de ladrillo refractario K32 bajo un patrón tipo aparejo con un recubrimiento central sobresaliente de mayor grosor y

Ingeniería Mecatrónica

Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

dimensionado a la abertura de la cámara térmica de tal manera que al cerrar la puerta dicho recubrimiento central de mayor grosor actuó como un sello de cierre hermético, ver Figuras de la 44 a la 47. Una vez montada la puerta en el horno, se adaptó un sistema de cierre manual de tipo perno deslizante con tubular de 1/2", ver Figura 48.



Figura 30. Recubrimiento del piso y paredes interiores con piso cerámico.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 31. Recubrimiento parcial de paredes con ladrillo refractario M-25.



Figura 32. Colocación completa del ladrillo refractario M-25.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 33. Recubrimiento inicial de paredes con ladrillo refractario K32.



Figura 34. Colocación de placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 35. Construcción inicial de la cúpula.



Figura 36. Primera capa de nivelación con mortero sobre la cúpula.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 37. Segunda capa de mortero con malla de metal desplegado sobre la cúpula.



Figura 38. Última capa recubriendo con piso cerámico y afinando detalles con mortero.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 39. Vista de la cúpula concluida.



Figura 40. Cobertura de los espacios de la cúpula.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 41. Construcción del marco de la puerta.



Figura 42. Sistema de bisagra: soporte creado para bisagra en parte inferior de la estructura.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 43. Sistema de bisagra: base giratoria para estructura de refuerzo de la puerta.



Figura 44. Estructura de la puerta con placa y refuerzos ya soldados.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 45. Vista de la puerta completamente ensamblada.



Figura 46. Puerta con recubrimiento de ladrillos.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 47. Sello de la puerta para ajuste de cierre hermético del equipo.



Figura 48. Sistema de cierre del horno.

4.2.4 Acabado final del horno

De las Figuras 49 a la 52, se presentan vistas del horno de tratamiento térmico concluido en su etapa de manufactura.



Figura 49. Vista frontal del horno de tratamiento térmico concluido.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 50. Vista lateral del horno de tratamiento térmico concluido.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas



Figura 51. Vista de la cámara térmica del horno de tratamiento térmico concluido.



Figura 52. Vista completa del interior horno de tratamiento térmico concluido.

4.3 PRUEBAS DE CALENTAMIENTO

El horno de tratamiento térmico manufacturado fue puesto en operación en pruebas simples de calentamiento a una potencia máxima de 1200 °C. En la Figura 53, se presenta el comportamiento térmico obtenido del calentamiento del horno. Como se aprecia, la tendencia es ascendente en todo momento por lo que se puede considerar que existe un buen confinamiento del calor. No obstante, se detectaron fugas de calor por zonas del recubrimiento central de la puerta del horno evidenciando que el cierre hermético requiere de acciones de reingeniería para solventar las salidas de energía térmica detectadas.

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

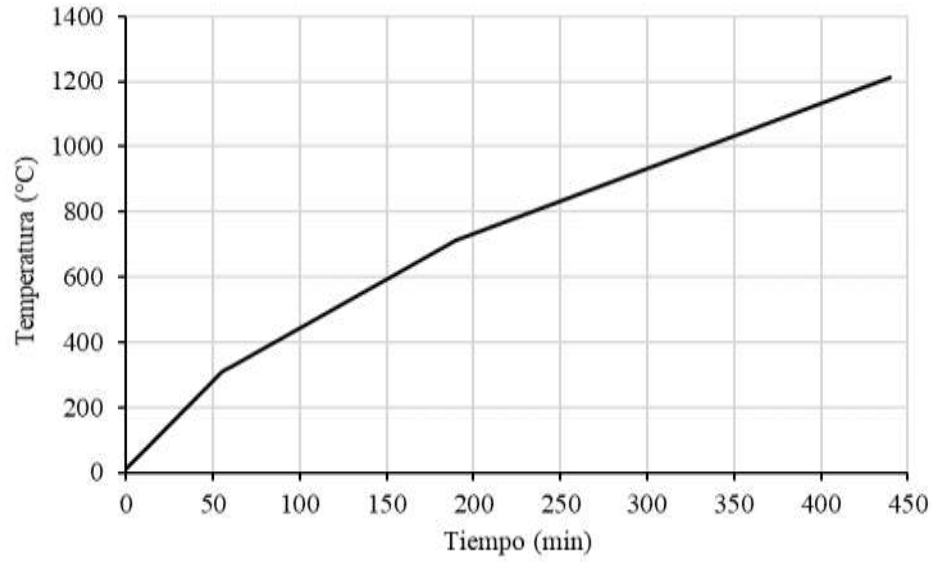


Figura 53. Curva térmica de calentamiento para 1200 °C.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se construyó un horno de tratamiento térmico hecho a la medida para aplicaciones metal-mecánicas de 1100×1085×1595 mm con una cámara térmica de 0.52 m³ revestida con ladrillo refractario y empleando 3 placas de fibra cerámica con resistencias eléctricas 4000W 220V. Diversas actividades de manufactura y mampostería refractaria fueron ejecutadas para lograr la construcción del horno bajo una configuración arquitectónica de tipo caja consistente de una estructura de soporte, una cámara térmica y un recubrimiento externo de seguridad.

Las operaciones de manufactura consistieron en elaborar la estructura de soporte y de fabricar el recubrimiento externo de seguridad, ambos a base de herrería, realizando actividades de corte, soldadura, esmerilado y pintado. Mientras que las actividades de mampostería refractaria fueron aplicadas para construir la cámara térmica ejecutando principalmente acciones de albañilería.

El costo de producción del equipo se estima en MXN \$106,992.47 sin considerar los costos de mano de obra, de envío, impuestos aplicables y depreciaciones. En el Anexo 1, se presenta una estimación del costo total del horno considerando varios criterios supuestos de cálculo.

Pruebas simples de calentamiento permitieron evidenciar que el horno construido logró alcanzar y mantener el calentamiento de la cámara térmica sin carga a 1200 °C por lo que se puede indicar que se cumple con la hipótesis de manufacturar un equipo de tratamiento térmico para piezas metal mecánicas debido a que se alcanza y se mantiene un calentamiento estable. No obstante, durante el calentamiento del prototipo se presentaron fugas de calor en la zona de la puerta y el cierre hermético del sistema.

Como trabajo a futuro, se deben realizar acciones de reingeniería en el horno para suprimir las fugas de calor, así como aplicar un diseño experimental para validar la puesta en operación del sistema. De igual manera se sugiere elaborar un estudio de rentabilidad y de mercado que coadyuve a validar la capacidad del sistema de ser económicamente sustentable.

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* (2nd ed.) (135-147). ASM International.
- [17] Tratamiento térmico de metales. (2014). En Groover, M. P. (Ed.), *Introducción a los procesos de manufactura*, (1^a 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.

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
DurezAplicada Tratamientos Térmicos	https://www.durezaplicada.com.mx/	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	https://www.tratamientosomega.com.mx/	Monterrey, N.L., México	—	Temple, revenido, cementación, alivio de esfuerzos
TRATERM. S.A. de C.V.	https://traterm.com.mx/	Ecatepec de Morelos, Méx., México	(55) 5699-8099	Temple, revenido, carburizado, nitruración, recocido
Tratamientos Térmicos Industrial	https://tratamientos-termicos-industrial.webnode.mx/	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.	https://www.ttavanzados.com/	Monterrey, N.L., México	—	Temple en atmósfera controlada, nitruración, carburizado
Especialidades Térmicas	https://especialidadestermicas.com/	Cuautitlán Izcalli, Méx., México	—	Temple, revenido, recocido, normalizado
Tratamientos Térmicos Termetal	—	San Pablo Autopan, Méx., México	—	Temple, revenido
METREMEX – Tratamientos Térmicos	https://www.metremex.com/	Tlalnepantla, Méx., México	(55) 5715-4620	Temple, carburizado, nitruración, revenido

Ingeniería Mecatrónica
Manufactura de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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	https://www.he-at-treatment-services.com/	Ramos Arizpe, Coah., México	(844) 277-2257	Temple al vacío, LPC (carburizado a baja presión), nitruración, revenido
HT-MX Tratamientos Secundarios	https://www.htmx.com/	Chihuahua, Chih., México	(614) 492-3800	Temple, carburizado, HIPing, análisis metalográfico
Termitec, S.A. de C.V.	https://en.termitec.com.mx/	CDMX y Puebla, México	(55) 9173-0159	Nitruración en sales, austempering, carburizado
Acerurgia	https://acerurgia.com.mx/	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.	https://dowa-tht.mx/	Villa de Reyes, S.L.P., México	(444) 478-2000	Nitruración, carburizado, temple en atmósfera controlada

ANEXO 2

Supuesto de estimación del costo total del horno de tratamiento térmico

Tabla AT2. Estimación del costo total del horno de tratamiento térmico.

CONCEPTO	CRITERIO DE CÁLCULO	MONTO (MXN)
Costo base de fabricación	Materiales y manufactura directa (sin extras)	\$106,992.47
Transporte de materiales (flete)	0.5 t × distancia promedio × \$10 MXN/km·t (CDMX, Saltillo, Guadalajara)	\$6,600.00
Mano de obra	30 % del costo base de fabricación	\$32,098.00
Subtotal antes de impuestos	Suma de materiales + flete + mano de obra	\$145,690.47
IVA (16 %)	Aplicado al subtotal	\$23,310.00
Imprevistos y consumibles	8 % del subtotal antes de impuestos	\$11,655.00
Costo total estimado del horno	Inversión total (precios 2025)	\$180,655.00
Vida útil estimada	Criterio técnico de equipo térmico	7 años
Depreciación anual estimada	Costo total / vida útil	\$25,800.00 MXN/año

ANEXO 3

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

MARK ANTONY MUÑOZ FLORES

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.