



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®

Instituto Tecnológico de Pabellón de Arteaga



**“Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno
de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas”**

TITULACIÓN INTEGRAL

TESIS

Para Obtener el Grado de:

Ingeniero Mecatrónico

PRESENTA:

Román Atzin Andrade Puga

TUTORES:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

Pabellón de Arteaga, Ags., febrero del 2026



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO®



INSTITUTO TECNOLÓGICO DE PABELLÓN DE ARTEAGA
SUBDIRECCIÓN ACADÉMICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍAS

Tesis:

**“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE
UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES
METAL-MECÁNICAS”**

Presenta:

Román Atzin Andrade Puga

Dirigida por:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

Pabellón de Arteaga, Ags., febrero del 2026

AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo de investigación está dedicado, en primer lugar, a mis padres, quienes me dieron la vida: Mónica Puga Velázquez y Juan Román Andrade Carreón, quienes han sido un pilar fundamental a lo largo de mi formación académica. Su amor, esfuerzo, paciencia y apoyo incondicional, especialmente en los momentos más difíciles, han sido la base que me permitió continuar y superar cada obstáculo sin desistir. Gracias a sus enseñanzas y sacrificios, hoy puedo culminar una etapa fundamental de mi formación profesional.

A mi hermana Xiomara, cuyo cariño y presencia han sido una constante fuente de motivación a lo largo de este camino. Su apoyo incondicional en los momentos más difíciles me ha recordado la importancia de perseverar y cumplir mis metas.

Agradezco profundamente a todos mis familiares, quienes con sus palabras de aliento y sabios consejos me han fortalecido en este proceso. En especial, a mis abuelos paternos y maternos, a quienes con orgullo llamo mis segundos padres, por haber estado presentes en cada uno de mis logros y desafíos, brindándome su apoyo sincero e incondicional.

Dedico también un espacio en mi corazón a aquellos seres queridos que ya partieron, quienes en vida me motivaron con historias y pláticas simples. Su legado y recuerdo permanecen presentes en este logro.

Este recorrido me ha enseñado que la familia constituye uno de los pilares fundamentales en la vida, una fortaleza que nos sostiene y nos impulsa a alcanzar nuestras metas más importantes.

Agradezco a mis amigos y compañeros, quienes con su amistad, compañerismo y apoyo desinteresado hicieron que este proceso académico fuera más llevadero, convirtiendo cada reto de aprendizaje en momentos de satisfacción compartida.

También a mis docentes, quienes con su paciencia y dedicación fueron clave en mi formación académica y profesional.

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 **"EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS"** del estudiante **ROMÁN ATZIN ANDRADE PUGA** con número de control 211050153 de la carrera de Ingeniería Mecatrónica. Dicho trabajo ya fue revisado por cada uno de los miembros del comité tutorial y el estudiante ya realizó los cambios sugeridos, por lo que autorizamos su impresión.

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

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica®
Tierra Siempre fértil®



MII. VÍCTOR MANUEL VELASCO GALLARDO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DR. JOSÉ ALONSO DENA AGUILAR
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL



DR. ENRIQUE JAVIER MARTÍNEZ DELGADO
MIEMBRO DE COMITÉ TUTORIAL

Pabellón de Arteaga, Ags.,

08/enero/2026

ROMÁN ATZIN ANDRADE PUGA
ESTUDIANTE DE LA CARRERA DE INGENIERÍA MECATRÓNICA
NO. DE CONTROL 211050153

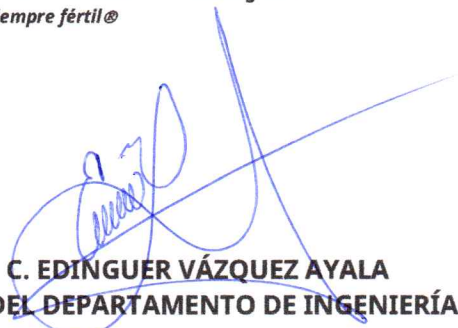
PRESENTE

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: **"EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO TÉRMICO 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

“EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DEL DESEMPEÑO TÉRMICO DE UN HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO PARA APLICACIONES METAL-MECÁNICAS”

Por: **ROMÁN ATZIN ANDRADE PUGA**

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 estructural 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 validación experimental. Mediante un protocolo experimental exploratorio se determinó de manera preliminar que, en promedio el horno de tratamiento térmico obtenido, tiene un gradiente de temperatura de 25.05 °C cada 5 minutos operando el equipo vacío sin carga.

Dirigido por:

MII. Víctor Manuel Velasco Gallardo

Dr. José Alonso Dena Aguilar

Dr. Enrique Javier Martínez Delgado

ÍNDICE GENERAL

	Pág.
I. INTRODUCCIÓN	1
1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.2.1 Objetivo general.....	2
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 HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE TRABAJO.....	27
3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL.....	30
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	34
4.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL.....	34

	Pág.
V. CONCLUSIONES	43
VI. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	44
ANEXO 1. Empresas o talleres nacionales dedicadas al servicio de tratamiento térmico industrial.....	47
ANEXO 2. Datos de temperatura promedio registrados durante los ensayos de calentamiento.....	49
ANEXO 3. Acceso universal al conocimiento: difusión y divulgación científica.....	55

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 Vista frontal del horno de tratamiento térmico concluido y empleado en los ensayos experimentales.....	28
13 Sistema de control de temperatura empleado en las pruebas experimentales.....	29
14 Sistema de control de temperatura mediante controlador XMTG-808.....	31
15 Vista interna de la cámara térmica en modo de calentamiento con las resistencias eléctricas encendidas.....	32
16 Esquema representativo de la metodología experimental aplicada.....	33
17 Curvas térmicas de calentamiento para 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C.....	35
18 Acercamiento de curvas térmicas de calentamiento para 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C.....	35
19 Curva térmica de calentamiento para 200 °C.....	36
20 Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 200 °C.....	36
21 Curva térmica de calentamiento para 400 °C.....	37
22 Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 400 °C.....	37
23 Curva térmica de calentamiento para 600 °C.....	38
24 Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 600 °C.....	38
25 Curva térmica de calentamiento para 800 °C.....	39
26 Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 800 °C.....	39
27 Curva térmica de calentamiento para 1000 °C.....	40
28 Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 1000 °C.....	40

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

	Pág.
29 Curva térmica de calentamiento para 1200 °C.....	41
30 Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 1200 °C.....	41
31 Desviaciones estándar de los ensayos experimentales de estudio.....	42
AF1 Constancia fase local, InnovaTecNM 2025.....	55
AF2 Constancia fase regional, InnovaTecNM 2025.....	56

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla		Pág.
AT1	Listado de empresas o talleres con servicios de tratamiento térmico.....	47
AT2	Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$	49
AT3	Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 400\text{ }^{\circ}\text{C}$	50
AT4	Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 600\text{ }^{\circ}\text{C}$	51
AT5	Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$	52
AT6	Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 1000\text{ }^{\circ}\text{C}$	53
AT7	Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$	54

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] diseño 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

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico 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 validación experimental a través de la aplicación de un protocolo experimental exploratorio.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo general

Validar técnicamente el prototipo de horno de tratamiento térmico hecho a la medida mediante su puesta en operación sin carga para determinar el gradiente de temperatura del prototipo.

1.2.2 Objetivos específicos

- Definir las variables de operación del proceso mediante la identificación de la respuesta, factores, rangos y niveles operativos para establecer un diseño experimental de calentamiento.
- Definir el diseño experimental de trabajo a través de la selección del tipo de diseño acorde a las variables definidas para la validación experimental del equipo.
- Llevar a cabo pruebas de calentamiento del prototipo sin carga mediante el diseño experimental establecido para la validación técnica del equipo.
- Realizar el monitoreo y registro de las variables de operación del equipo por medio de un sistema de control on-off para determinar el gradiente térmico del prototipo.
- Analizar los datos experimentales obtenidos mediante técnicas de estadística descriptiva para comprobar el correcto funcionamiento técnico del prototipo.

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 presenta un gradiente de temperatura estable y una distribución térmica uniforme durante su operación sin carga, cumpliendo con las condiciones técnicas necesarias para la aplicación de tratamientos térmicos en piezas metálicas.

1.5 ALCANCES Y LIMITACIONES

- Únicamente se realizan ensayos preliminares de calentamiento y solo un tipo de diseño experimental es considerado como medio de validación técnica del prototipo.
- En base a los resultados experimentales obtenidos, ninguna acción de reingeniería fue considerada por lo que está fuera de alcance la optimización del equipo.

1.6 GENERALIDADES

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

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

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

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

II. MARCO TEÓRICO

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

2.1 TRATAMIENTO TÉRMICO PARA COMPONENTES MECÁNICOS

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

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

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

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

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

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

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

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

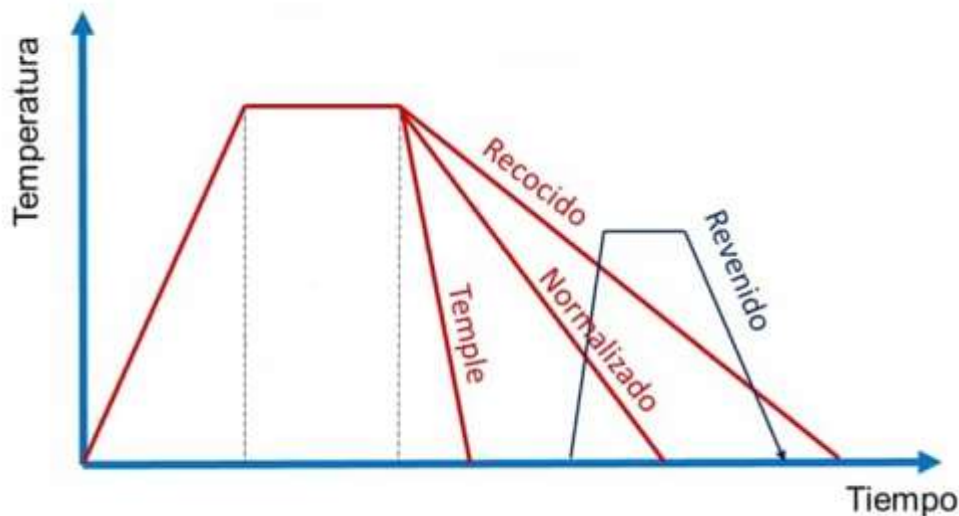


Figura 1. Tipos de tratamientos térmicos [19].



Figura 2. Tratamiento térmico de temple [19].

2.2 PROPIEDADES DEL TRATAMIENTO TÉRMICO

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

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



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

2.2.1 Métodos de ensayo de dureza para aceros

a. Ensayo Brinell (HB)

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

Ingeniería Mecatrónica

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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

Ingeniería Mecatrónica

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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 perfora 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].

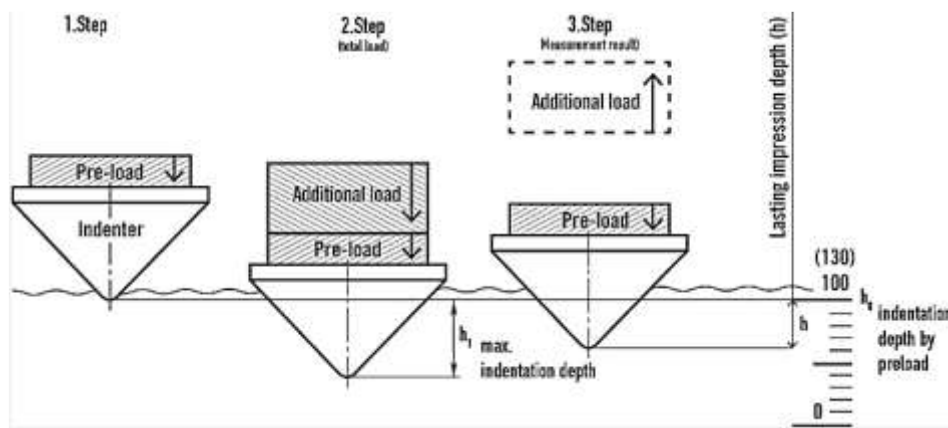


Figura 4. Procedimiento de tres pasos del ensayo de dureza Rockwell, mostrando la aplicación de pre-carga, carga total y medición de la profundidad de indentación permanente [25].

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

Ingeniería Mecatrónica

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico 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].

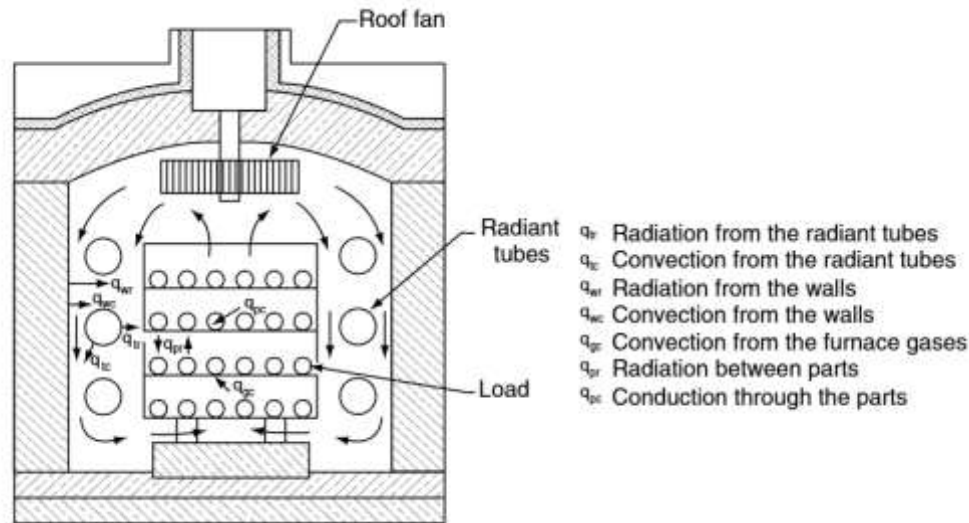


Figura 5. Horno de tratamiento térmico con atmósfera controlada [29].

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.

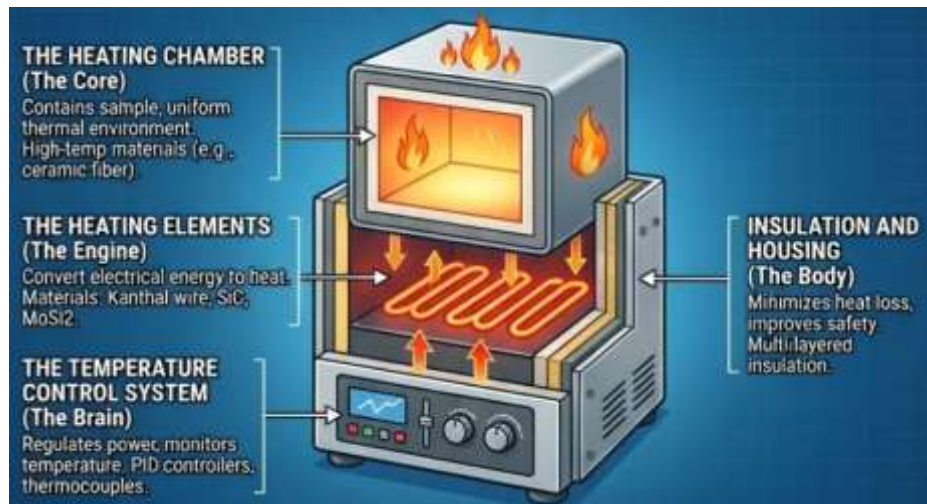


Figura 6. Diagrama esquemático de los componentes principales de un horno de tratamiento térmico [31].

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

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico 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.

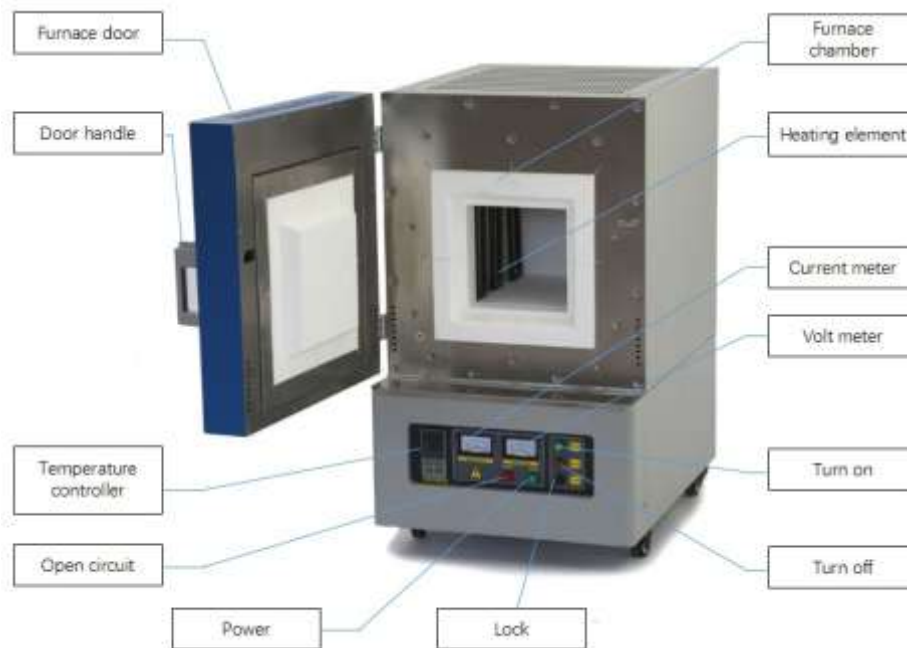


Figura 7. Horno de tratamiento térmico tipo mufla mostrando sus componentes principales [33].

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.

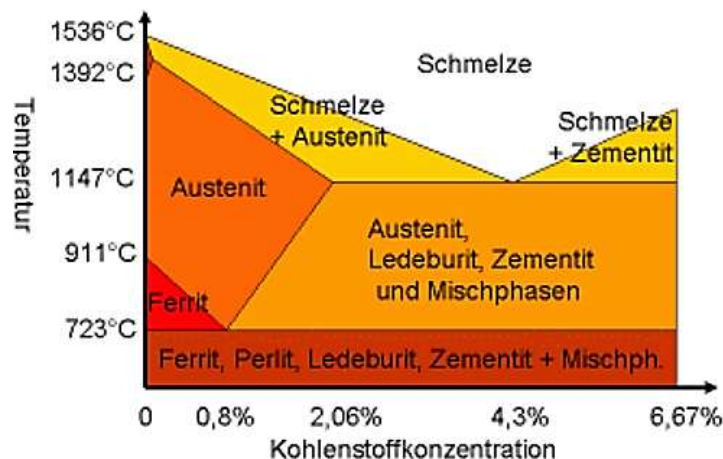


Figura 8. Diagrama de fases Fe-C [37].

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

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

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 [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.

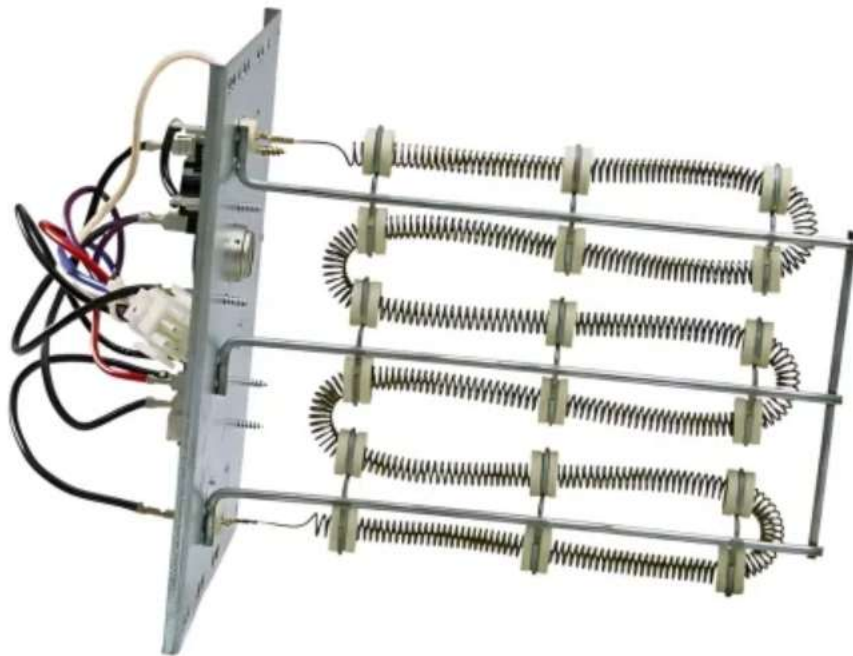


Figura 9. Resistencias eléctricas en espiral de aleación Níquel-Cromo [42].

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

Ingeniería Mecatrónica

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

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 describe el procedimiento experimental empleado para validar experimental y técnicamente el equipo de estudio empleado.

3.1 HORNO DE TRATAMIENTO TÉRMICO DE TRABAJO

En este estudio se empleó 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.

En la Figura 11, se presenta un diseño mecánico en vista isométrica del horno de estudio. Mientras que en la Figura 12 y Figura 13, se muestran el prototipo manufacturado, así como el sistema de control empleado en las experimentaciones, respectivamente.

La configuración arquitectónica del horno térmico se basó en 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.

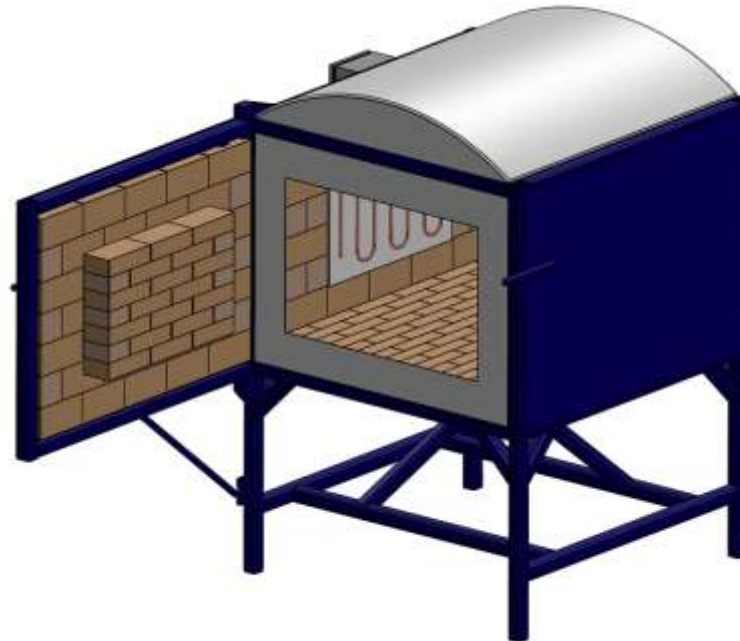


Figura 11. Diseño mecánico en vista isométrica del horno de tratamiento térmico de trabajo.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas



Figura 12. Vista frontal del horno de tratamiento térmico concluido y empleado en los ensayos experimentales.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas



Figura 13. Sistema de control de temperatura empleado en las pruebas experimentales.

3.2 DISEÑO EXPERIMENTAL

El horno de tratamiento térmico diseñado y manufacturado fue puesto en operación bajo condiciones de vacío, es decir, sin carga metálica ni atmósfera controlada, con el propósito de validar experimental y técnicamente la configuración final del equipo. Para ello, se definió un diseño experimental de carácter exploratorio, orientado a evaluar de manera preliminar la capacidad de calentamiento del horno e identificar posibles áreas de mejora o acciones de reingeniería sobre el prototipo.

Las pruebas de calentamiento se realizaron por triplicado mediante un diseño experimental simple exploratorio, en el cual se registró la variación de la temperatura en función del tiempo, con el objetivo de verificar el desempeño térmico del dispositivo. El monitoreo del equipo se llevó a cabo para alcanzar y mantener temperaturas de 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C, registrando las lecturas correspondientes cada 5 minutos. Durante los ensayos, el horno operó sin material metálico en su interior, y las temperaturas fueron registradas a través del sistema de control térmico integrado. Las pruebas se llevaron a cabo en el periodo del 15/11/2025 al 15/12/2025 con temperaturas ambiente promedio entre 9 y 11 °C. Todas las pruebas iniciaron a las 10:00 h (tiempo local) y concluyeron una vez que se alcanzó el valor de temperatura límite definido.

En la Figura 14, se presenta el sistema de control de temperatura empleado, el cual está integrado por un pirómetro XMTG-808 que funcionó como el controlador de temperatura y fue compatible con el sensor termopar tipo-K con capacidad de medición de hasta 1300 °C. Mediante este controlador se configuró el modo de operación de calentamiento automático del horno de tratamiento térmico que facilitó el registro y monitoreo de la temperatura en todos los ensayos experimentales mediante:

- (a) la variable de proceso (PV), indicada mediante una lectura en color rojo, correspondiente a la temperatura real del sistema, la cual se incrementa conforme aumenta el calor en el interior de la cámara térmica del prototipo;
- (b) la temperatura de consigna o control (SV), mostrada en color verde, que representa la temperatura límite de operación del equipo y corresponde a la condición experimental de estudio. Una vez que la temperatura del sistema alcanza el valor de consigna, el controlador ejecuta el apagado automático del horno. Posteriormente, cuando la temperatura desciende por debajo del valor establecido, el sistema se reactiva de manera automática. Este ciclo de encendido y apagado se repite de forma continua durante todo el periodo de prueba definido.

En la Figura 15, a manera representativa, se muestra el interior de la cámara del horno en funcionamiento, esto es, con las resistencias eléctricas encendidas generando el calor de tratamiento térmico.

El monitoreo de la temperatura del equipo en funcionamiento se realizó por medio del pirómetro y las lecturas se registraron de manera manual cada 5 min durante todo el tiempo de duración del ensayo, esto es, hasta que se

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

alcanzó la temperatura de estudio fijada. En la Figura 16, se observa un diagrama de flujo de la metodología experimental aplicada, la cual sigue los siguientes pasos:

1. Primeramente, se realiza la programación del controlador por parte del usuario indicando el SV a alcanzar y propiciado el encendido del horno.
2. Inmediatamente se inicia el proceso del calentamiento gradual del horno. Durante esta etapa se va monitoreando y registrando los valores de temperatura (PV).
3. En caso de alcanzarse el valor de SV, se propicia automáticamente el apagado del horno y se concluye el registro de datos, caso contrario, el calentamiento del sistema se continua hasta cumplir la condición SV experimental fijada.



Figura 14. Sistema de control de temperatura mediante controlador XMTG-808.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

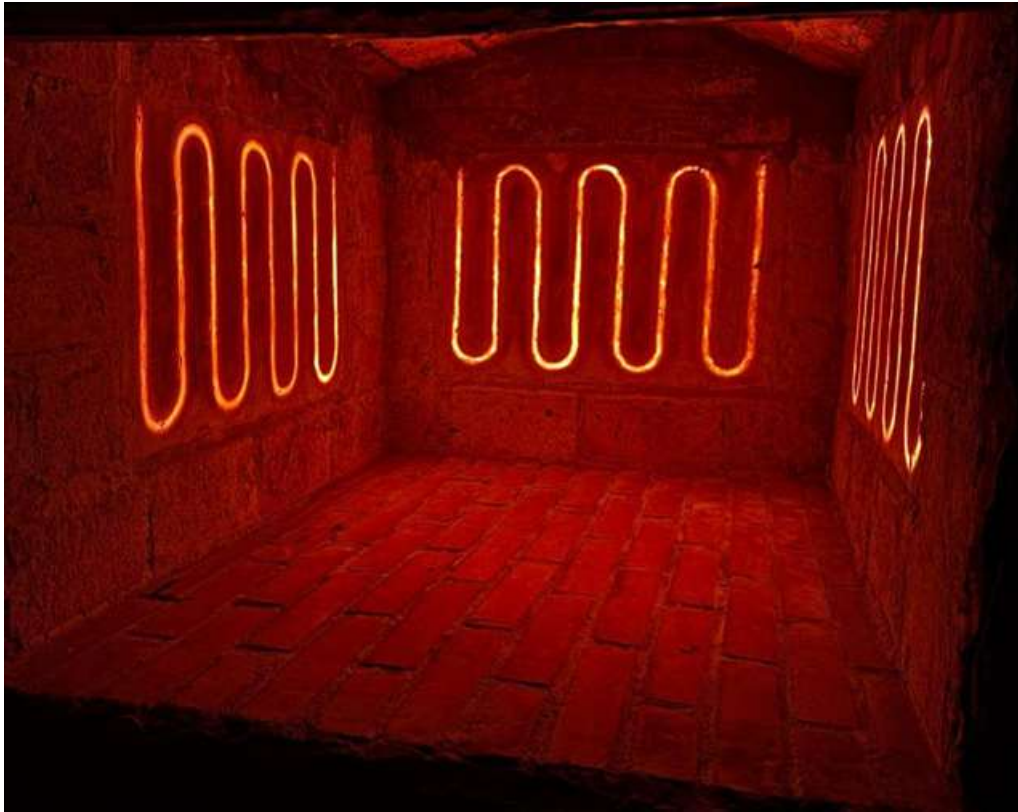


Figura 15. Vista interna de la cámara térmica en modo de calentamiento con las resistencias eléctricas encendidas.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

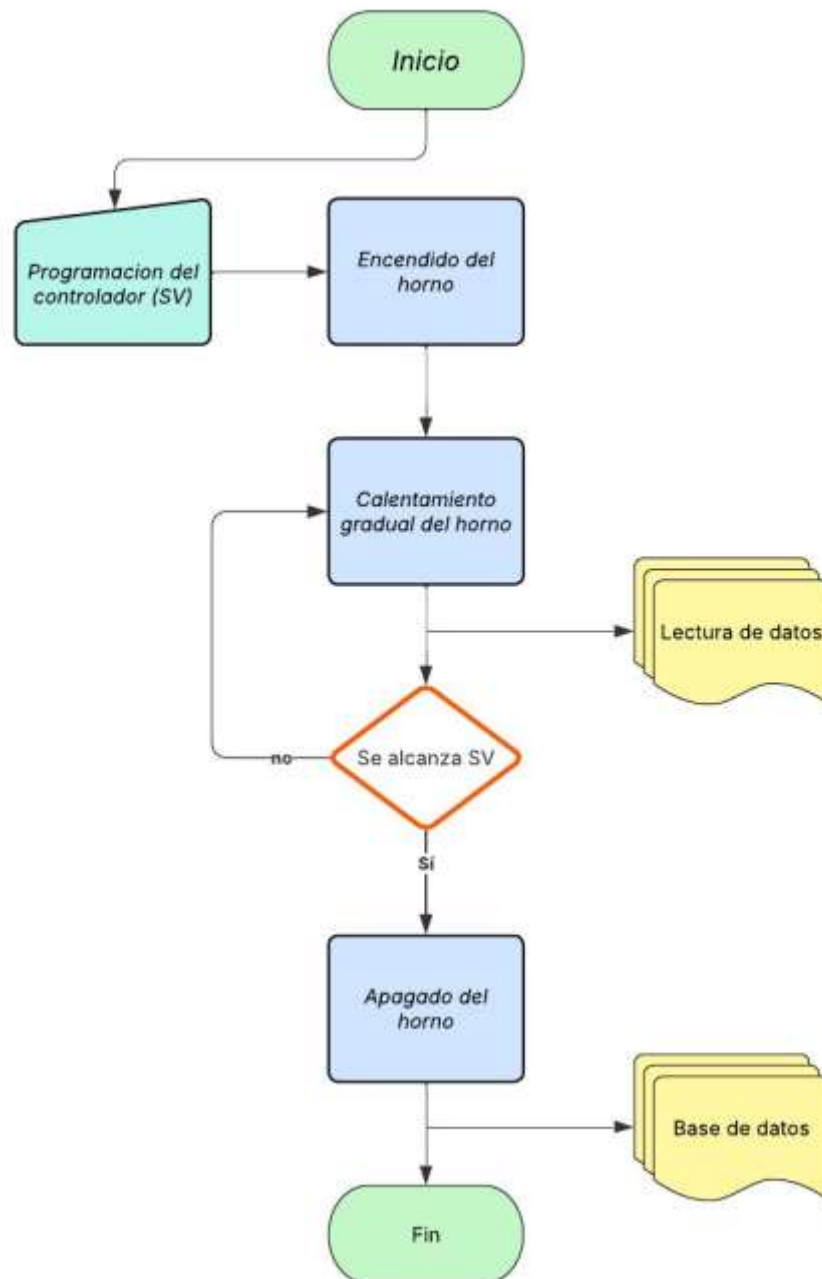


Figura 16. Esquema representativo de la metodología experimental aplicada.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

En esta sección se detallan los logros experimentales preliminares alcanzados orientados a la determinación del gradiente de temperatura del equipo operado en vacío sin carga.

4.1 VALIDACIÓN EXPERIMENTAL

Mediante la aplicación del diseño experimental exploratorio definido, se obtuvieron curvas térmicas del calentamiento del equipo a través de la puesta en funcionamiento del horno de tratamiento térmico operado al vacío, esto es, sin material metálico sujeto a tratamiento, para alcanzar las temperaturas de 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C.

En la Figura 17, se visualizan las curvas térmicas del calentamiento del equipo obtenidas con la puesta en funcionamiento del horno de tratamiento térmico para alcanzar las temperaturas de 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C. En promedio, el gradiente de temperatura del equipo fue de 25.05 °C cada 5 minutos con comportamientos térmicos ascendentes y similares entre cada prueba ejecutada. En la Figura 18, se observa un acercamiento de la operación de calentamiento del equipo. En ella se denota como las tendencias de cada curva son similares, pero con diferencias de valores térmicos registrados

En las Figuras de la 19, 21, 23, 25, 27 y 29, se visualizan las curvas térmicas del calentamiento del equipo para alcanzar las temperaturas SV de 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C, respectivamente. Como era de esperarse, a mayor temperatura límite de estudio (SV) mayor tiempo de calentamiento requerido para alcanzar la misma.

En las Figuras 20, 22, 24, 26, 28 y 30, se observan acercamientos de la operación de calentamiento del equipo de cada curva. Como se ha descrito anteriormente, de manera común, en cada curva e indistintamente de la temperatura SV fijada, se presentaron tendencias ascendentes de calentamiento similares, pero con diferencias de valores térmicos registrados. Como bien se aprecia, en cada curva, el calentamiento es gradual desde una temperatura ambiente del equipo hasta alcanzar la temperatura SV límite definida. En el Anexo 2, se presentan los valores térmicos empleados para la construcción de las curvas térmicas.

Finalmente, mediante técnicas de estadística descriptiva, la desviación estándar que se presentó en cada curva térmica dentro del intervalo de 0 a 200 °C fue de 60.3, 64.5, 59.6, 60.4, 64.9 y 61.9 °C para las temperaturas de operación de 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C, respectivamente, con un rango de 5.3 °C y una diferencia promedio de 3.5 °C entre los valores de desviación estándar. Mientras que para el intervalo de 200 a 400 °C fueron de 61.2, 64.8, 62.2, 58.0 y 61.9 °C para las temperaturas de 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C, respectivamente, con un rango de 6.9 °C y una diferencia promedio de 3.6 °C. En la Figura 31, se muestran los valores de desviación estándar obtenidos.

Los valores estadísticos obtenidos evidenciaron que el horno de tratamiento térmico presentó un calentamiento térmico estable. No obstante, en la práctica se apreció que el sistema hermético de la puerta de cierre principal se

Ingeniería Mecatrónica

Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

vio comprometido por fugas de calor que pudieron incidir en el resultado de gradiente térmico obtenido. Motivo por el cual, acciones de reingeniería deben ser aplicadas y demás ensayos térmicos bajo diseños experimentales rigurosos y empleando piezas metálicas como receptores del calor de trabajo deben llevarse a cabo como trabajo a futuro para sustentar la validación técnica adecuada del prototipo.

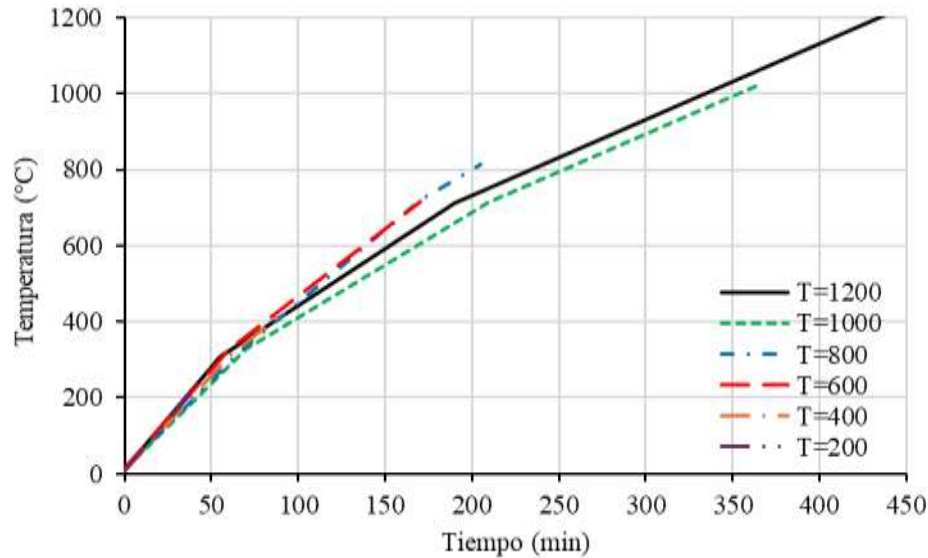


Figura 17. Curvas térmicas de calentamiento para 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C.

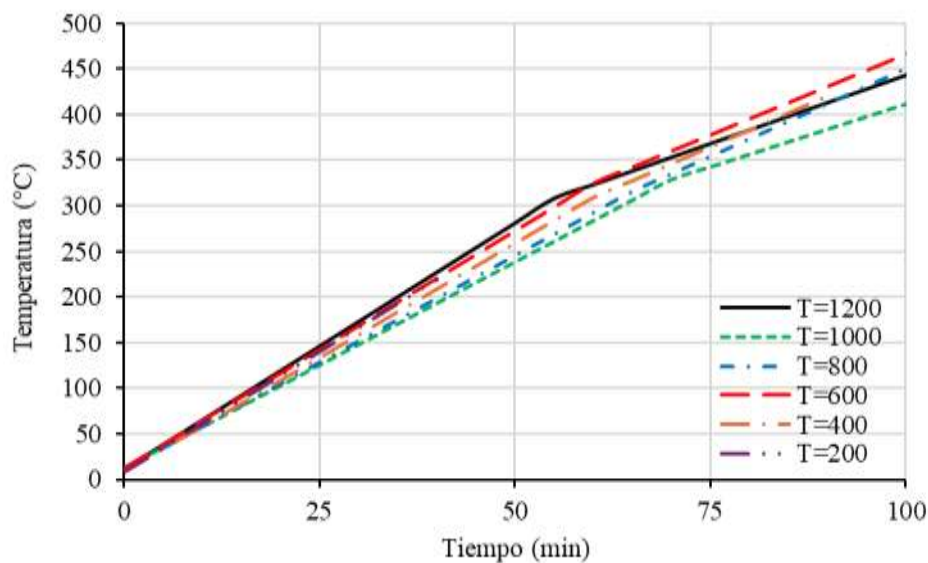


Figura 18. Acercamiento de curvas térmicas de calentamiento para 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

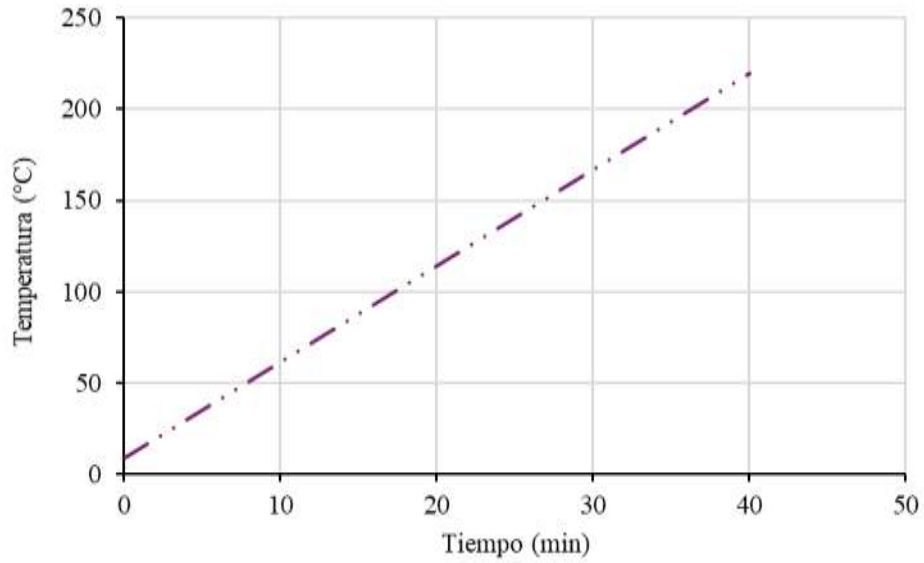


Figura 19. Curva térmica de calentamiento para 200 °C.

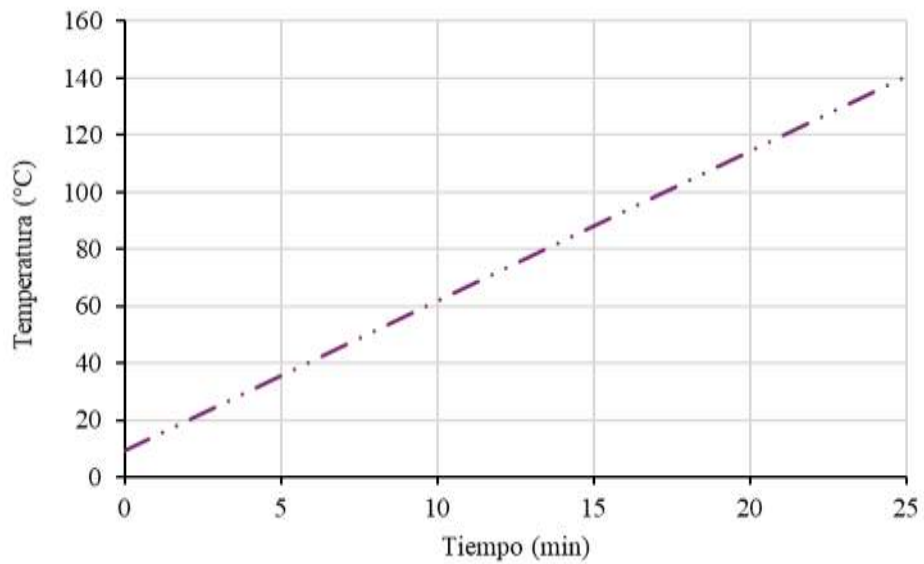


Figura 20. Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 200 °C.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

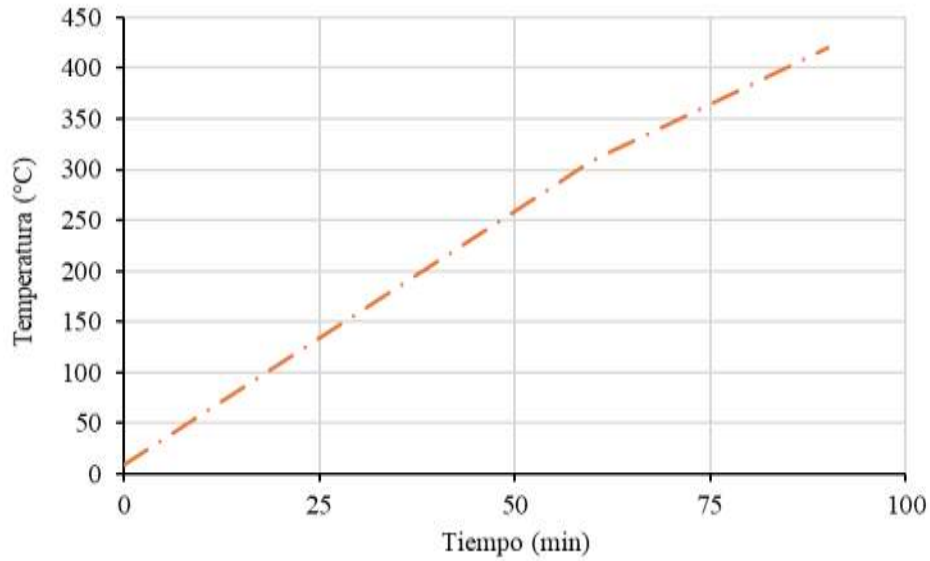


Figura 21. Curva térmica de calentamiento para 400 °C.

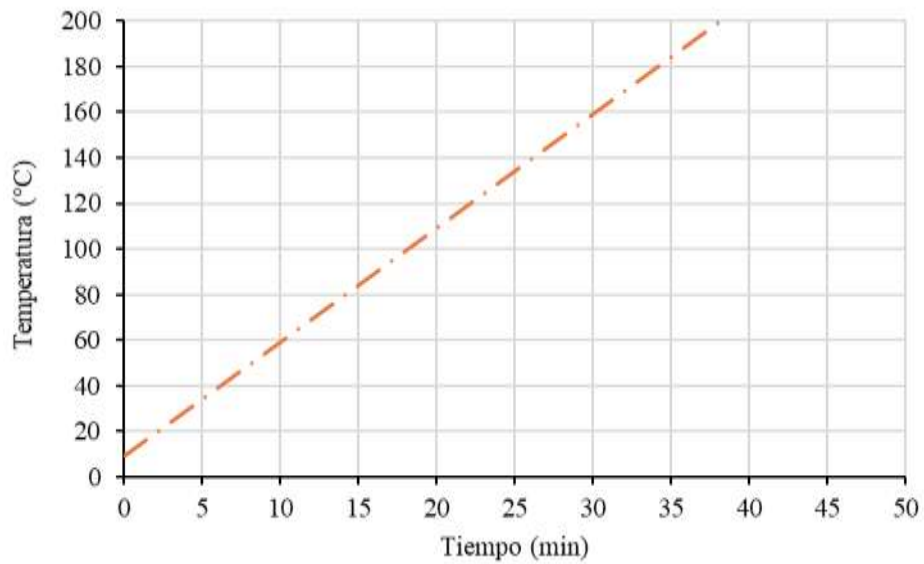


Figura 22. Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 400 °C.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

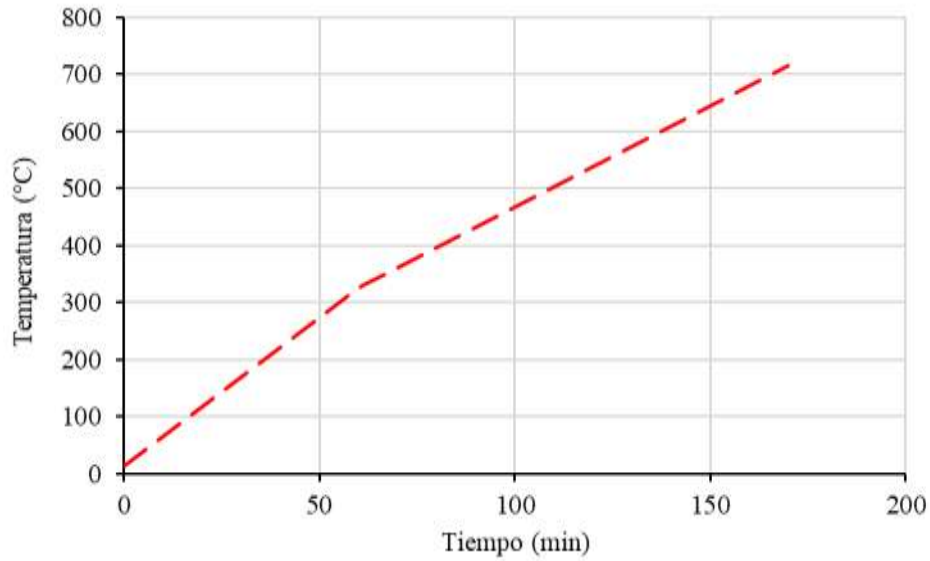


Figura 23. Curva térmica de calentamiento para 600 °C.

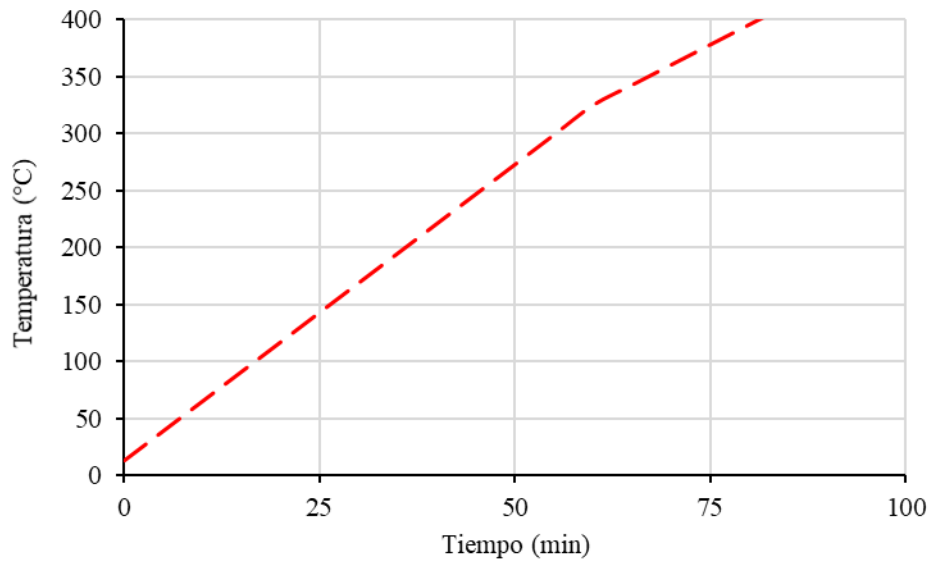


Figura 24. Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 600 °C.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

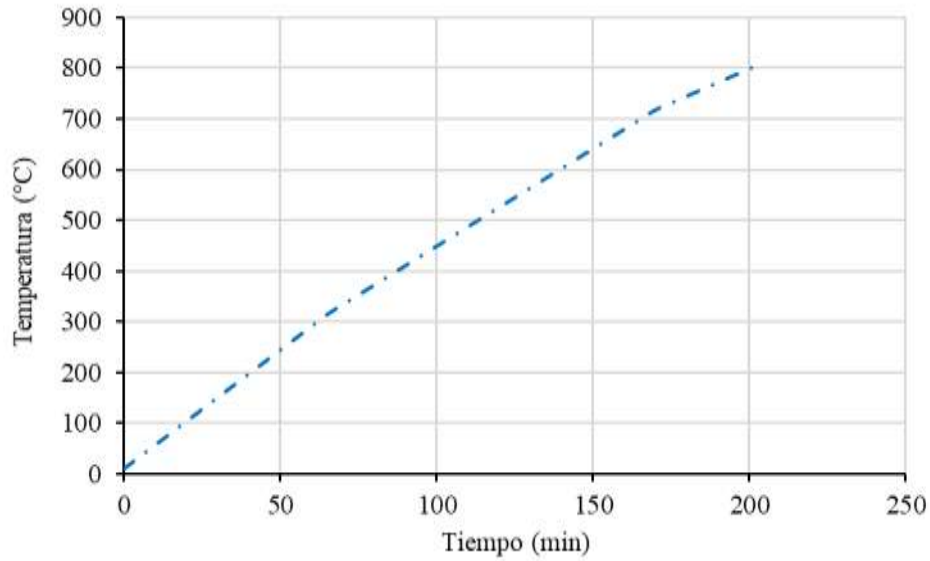


Figura 25. Curva térmica de calentamiento para 800 °C.

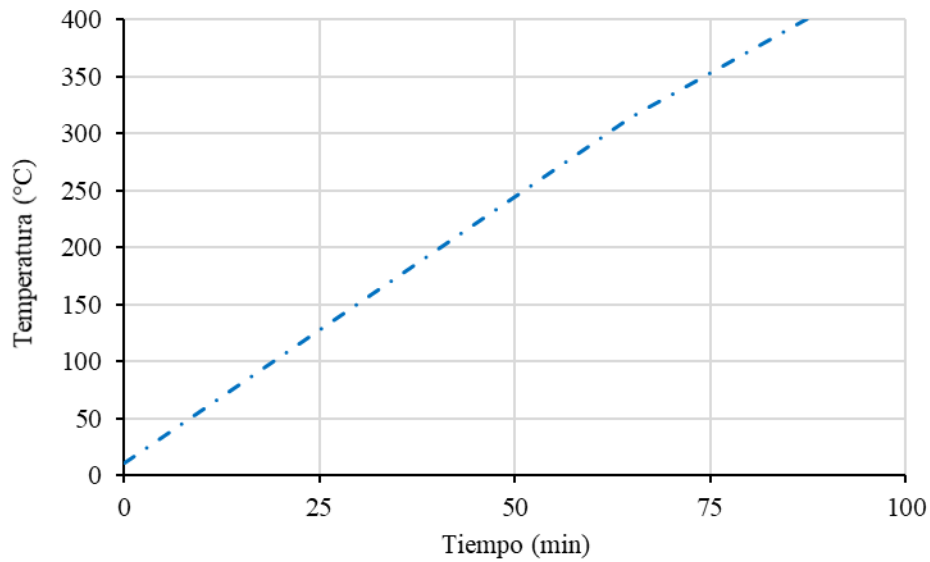


Figura 26. Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 800 °C.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

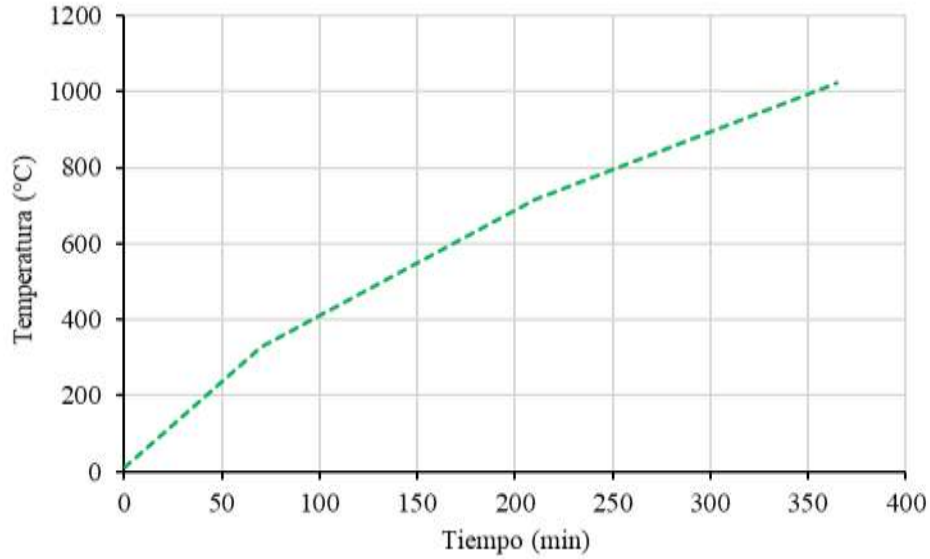


Figura 27. Curva térmica de calentamiento para 1000 °C.

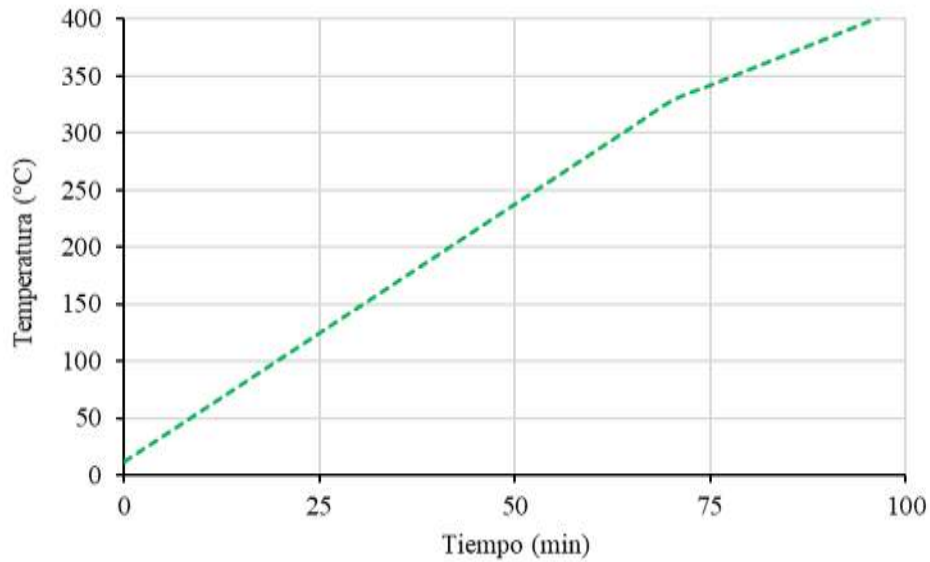


Figura 28. Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 1000 °C.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

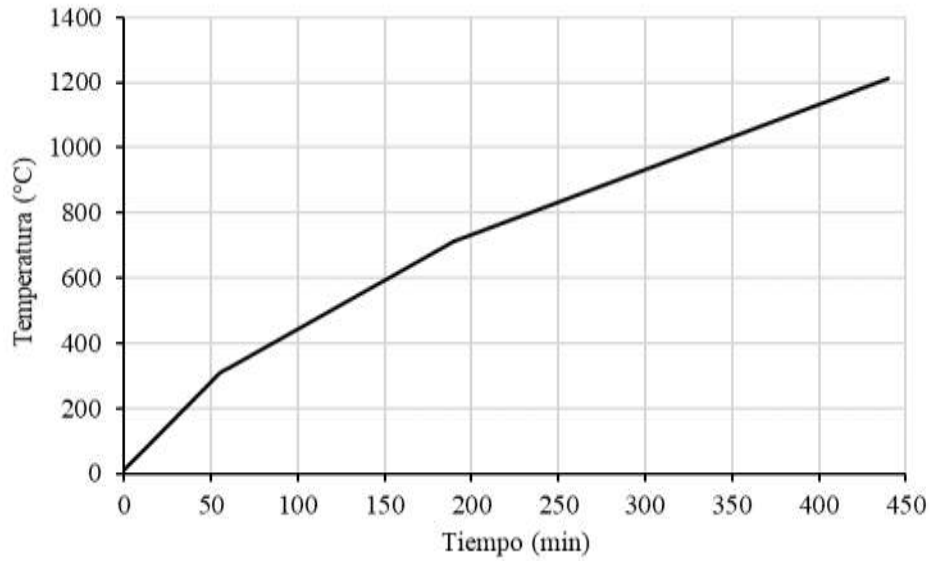


Figura 29. Curva térmica de calentamiento para 1200 °C.

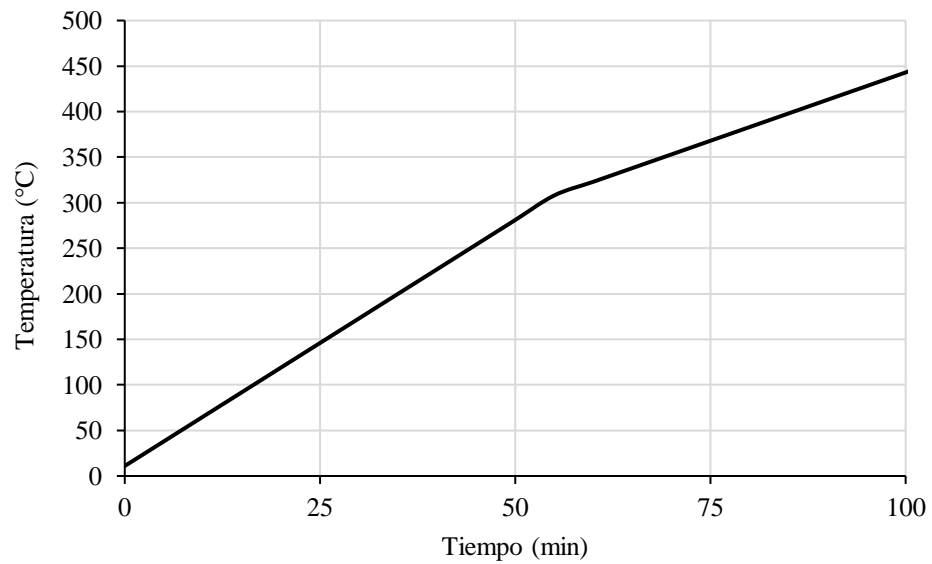


Figura 30. Acercamiento de curva térmica de calentamiento para 1200 °C.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones Metal-Mecánicas

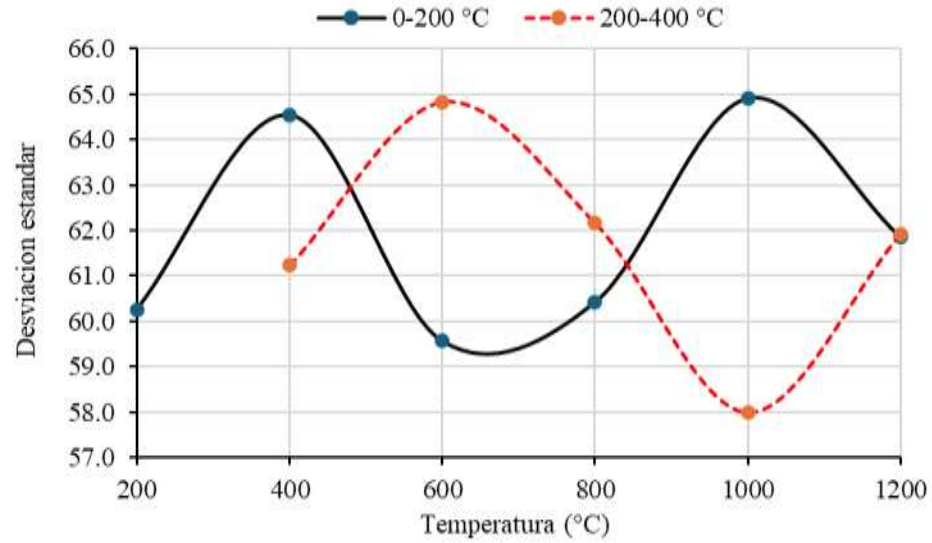


Figura 31. Desviaciones estándar de los ensayos experimentales de estudio.

V. CONCLUSIONES

En este trabajo, se desarrolló una metodología experimental para validar técnicamente el funcionamiento de un horno de tratamiento térmico hecho a la medida, vacío, sin carga y sin atmosfera controlada, a través de un diseño experimental exploratorio.

La variable de respuesta identificada fue la temperatura que se alcanzó en la cámara térmica del prototipo durante el calentamiento de la misma y en la cual se registró la variación de la temperatura en función del tiempo para alcanzar y mantener temperaturas de estudio de 200, 400, 600, 800, 1000 y 1200 °C.

Se realizaron pruebas de operación preliminares de calentamiento del horno y, en promedio, el equipo obtenido tiene un gradiente de temperatura de 25.05 °C cada 5 minutos operando el equipo vacío sin carga.

Mediante un análisis estadístico descriptivo, el horno de tratamiento térmico presento valores de desviaciones estándar entre 59.6 y 64.9 °C para las temperaturas de operación entre 200 y 1200 °C, así como entre 58.0 y 64.8 °C para temperaturas entre 400 y 1200 °C. Estos resultados fueron consistentes con el dato de gradiente de temperatura obtenido por lo que se concluye que el equipo es técnicamente viable para llevar a cabo el tratamiento térmico de piezas metálicas.

No obstante, como trabajo a futuro, se deben aplicar acciones de reingeniería al prototipo para suprimir las fugas de calor detectadas. Así mismo, demás ensayos térmicos bajo diseños experimentales rigurosos y empleando piezas metálicas como receptores del calor de trabajo deben llevarse a cabo como trabajo a futuro para sustentar la validación técnica adecuada del prototipo.

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.

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

- [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->

ANEXO 1

Empresas o talleres nacionales dedicadas al servicio de tratamiento térmico industrial

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

EMPRESA	PÁGINA WEB	DOMICILIO	TELÉFONO	PROCESOS OFRECIDOS
Tratamientos Térmicos de Querétaro, S.A. de C.V.	—	Querétaro, Qro., México	—	Temple, revenido, normalizado, alivio de esfuerzos
Durez Aplicada Tratamientos Térmicos	https://www.durezaplicada.com.mx/	Av. Perilliar 19, Amp. Progreso Nacional, CDMX	(55) 5392-1521	Temple, revenido, cementación, nitruración, carbonitruración
Tratamientos Térmicos Emisa	—	CDMX, México	—	Temple, revenido, normalizado, recocado
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, recocado
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, recocado, 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
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico 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://dowatht.mx/	Villa de Reyes, S.L.P., México	(444) 478-2000	Nitruración, carburizado, temple en atmósfera controlada

ANEXO 2

Datos de temperatura promedio registrados durante los ensayos de calentamiento

Tabla AT2. Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tiempo (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	9
5	35.3
10	61.6
15	87.9
20	114.2
25	140.5
30	166.8
35	193.1
40	219.4

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

Tabla AT3. Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con SV = 400 °C.

Tiempo (min)	T (°C)
0	9
5	34
10	59
15	84
20	109
25	134
30	159
35	184
40	209
45	234
50	259
55	284
60	309
65	327.5
70	346
75	364.5
80	383
85	401.5
90	420

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

Tabla AT4. Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con SV = 600 °C.

Tiempo (min)	T (°C)
0	13
5	39
10	65
15	91
20	117
25	143
30	169
35	195
40	221
45	247
50	273
55	299
60	325
65	342.7
70	360.4
75	378.1
80	395.8
85	413.5
90	431.2
95	448.9
100	466.6
105	484.3
110	502
115	519.7
120	537.4
125	555.1
130	572.8
135	590.5
140	608.2
145	625.9
150	643.6
155	661.3
160	679
165	696.7
170	714.4

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

Tabla AT5. Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 800\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tiempo (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	11	105	468.8
5	34.4	110	488
10	57.8	115	507.2
15	81.2	120	526.4
20	104.6	125	545.6
25	128	130	564.8
30	151.4	135	584
35	174.8	140	603.2
40	198.2	145	622.4
45	221.6	150	641.6
50	245	155	660.8
55	268.4	160	680
60	291.8	165	699.2
65	315.2	170	718.4
70	334.4	175	731.9
75	353.6	180	745.4
80	372.8	185	758.9
85	392	190	772.4
90	411.2	195	785.9
95	430.4	200	799.4
100	449.6	205	812.9

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

Tabla AT6. Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 1000 \text{ }^\circ\text{C}$.

Tiempo (min)	T ($^\circ\text{C}$)	Tiempo (min)	T ($^\circ\text{C}$)
0	12	185	645.8
5	34.6	190	659.6
10	57.2	195	673.4
15	79.8	200	687.2
20	102.4	205	701
25	125	210	714.8
30	147.6	215	724.7
35	170.2	220	734.6
40	192.8	225	744.5
45	215.4	230	754.4
50	238	235	764.3
55	260.6	240	774.2
60	283.2	245	784.1
65	305.8	250	794
70	328.4	255	803.9
75	342.2	260	813.8
80	356	265	823.7
85	369.8	270	833.6
90	383.6	275	843.5
95	397.4	280	853.4
100	411.2	285	863.3
105	425	290	873.2
110	438.8	295	883.1
115	452.6	300	893
120	466.4	305	902.9
125	480.2	310	912.8
130	494	315	922.7
135	507.8	320	932.6
140	521.6	325	942.5
145	535.4	330	952.4
150	549.2	335	962.3
155	563	340	972.2
160	576.8	345	982.1
165	590.6	350	992
170	604.4	355	1001.9
175	618.2	360	1011.8
180	632	365	1021.7

Ingeniería Mecatrónica
Evaluación Experimental del Desempeño Térmico de un Horno de Tratamiento Térmico para Aplicaciones
Metal-Mecánicas

Tabla AT7. Datos experimentales promedio de la prueba de calentamiento con $SV = 1200\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Tiempo (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)	Tiempo (min)	T ($^{\circ}\text{C}$)
0	11	150	593	300	933
5	38	155	608	305	943
10	65	160	623	310	953
15	92	165	638	315	963
20	119	170	653	320	973
25	146	175	668	325	983
30	173	180	683	330	993
35	200	185	698	335	1003
40	227	190	713	340	1013
45	254	195	723	345	1023
50	281	200	733	350	1033
55	308	205	743	355	1043
60	323	210	753	360	1053
65	338	215	763	365	1063
70	353	220	773	370	1073
75	368	225	783	375	1083
80	383	230	793	380	1093
85	398	235	803	385	1103
90	413	240	813	390	1113
95	428	245	823	395	1123
100	443	250	833	400	1133
105	458	255	843	405	1143
110	473	260	853	410	1153
115	488	265	863	415	1163
120	503	270	873	420	1173
125	518	275	883	425	1183
130	533	280	893	430	1193
135	548	285	903	435	1203
140	563	290	913	440	1213
145	578	295	923		

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

ROMAN ATZIN ANDRADE PUGA

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.