



| POSGRADOS |

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA CON MENCIÓN EN DISEÑO DE SISTEMAS MECÁNICOS, HIDRÁULICOS Y TÉRMICOS

RPC-SO-24-NO.540-2020

OPCIÓN DE TITULACIÓN:

PROYECTO DE TITULACIÓN CON COMPONENTES DE
INVESTIGACIÓN APLICADA Y/O DE DESARROLLO

TEMA:

PROPUESTA DE MEJORA PARA EL
FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO DE
ALIVIO DE TENSIONES DE LA EMPRESA
TECNERO

AUTOR:

WILSON GUILLERMO BUSTAMANTE DE LOS RÍOS

DIRECTOR:

JOHN IGNACIO CALLE SIGUENCIA

CUENCA – ECUADOR
2025

Autor:**Wilson Guillermo Bustamante De Los Ríos**

Ingeniero Electrónico.

Candidato a Magíster en Ingeniería Mecánica con mención en Diseño De Sistemas Mecánicos, Hidráulicos Y Térmicos por la Universidad Politécnica Salesiana – Sede Cuenca.

wbustamanted@est.ups.edu.ec

Dirigido por:**John Ignacio Calle Sigüencia**

Ingeniero Mecánico.

Doctor en Ingeniería Industrial.

jcalles@ups.edu.ec

Todos los derechos reservados.

Queda prohibida, salvo excepción prevista en la Ley, cualquier forma de reproducción, distribución, comunicación pública y transformación de esta obra para fines comerciales, sin contar con autorización de los titulares de propiedad intelectual. La infracción de los derechos mencionados puede ser constitutiva de delito contra la propiedad intelectual. Se permite la libre difusión de este texto con fines académicos investigativos por cualquier medio, con la debida notificación a los autores.

DERECHOS RESERVADOS

2025 © Universidad Politécnica Salesiana.

CUENCA – ECUADOR – SUDAMÉRICA

WILSON GUILLERMO BUSTAMANTE DE LOS RÍOS

Propuesta de mejora para el funcionamiento de un horno de alivio de tensiones de la empresa Tecnero

Dedicatoria

A mi esposa, por ser mi compañera inseparable en cada desafío personal y profesional. Por despejar de mi mente todo aquello que pudiera distraerme de este objetivo, por animarme a seguir creciendo y asumir silenciosamente tantas responsabilidades con el fin de aligerar mi esfuerzo.

A mis pequeñas hijas, quienes con su ternura, su alegría inocente y sus abrazos espontáneos, fueron una fuente inagotable de motivación y fortaleza. Este logro es el reflejo del amor, la paciencia y el apoyo incondicional de mi familia. A ustedes les dedico este paso en nuestro camino de vida.

Agradecimientos

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a quienes hicieron posible la realización de este proyecto. Al Ing. John Calle, PhD., por su acertada dirección, su orientación constante y por brindarme siempre una visión clara y precisa en cada etapa del trabajo y de manera muy especial al Ing. Carlos Farías, por abrirme las puertas de TECNERO y depositar su confianza en mí para llevar a cabo esta propuesta de mejora en un elemento clave dentro de su proceso productivo. A todos ustedes, gracias por ser parte de este logro.

PROPUESTA DE MEJORA PARA EL FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO DE ALIVIO DE TENSIONES DE LA EMPRESA TECNERO

AUTOR:

WILSON GUILLERMO BUSTAMANTE DE LOS RÍOS

Resumen

El presente proyecto desarrolla una propuesta de mejora para el horno de alivio de tensiones (HAT) utilizado en la empresa Tecnero S.A., dedicada a la fabricación de cilindros de GLP. El equipo presenta pérdidas térmicas significativas, deterioro estructural y deficiencias en la distribución del calor, factores que afectan tanto la estabilidad del proceso como la eficiencia energética del sistema. El objetivo principal de esta investigación es optimizar el rendimiento térmico del horno y diseñar soluciones estructurales basadas en criterios de ingeniería y validación computacional.

El estudio inicia con una caracterización integral del horno mediante inspecciones de campo, análisis termográfico y mediciones de gases de combustión, lo que permite identificar zonas críticas de fuga de calor, degradación del revestimiento y comportamiento irregular del flujo de gases. El marco teórico abarca principios de termodinámica, transferencia de calor, combustión de GLP y selección de materiales refractarios, proporcionando los fundamentos para comprender las causas del deterioro y la baja eficiencia térmica.

Posteriormente, se aplica modelado numérico mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) para evaluar la distribución de temperatura y la interacción de los gases dentro de la cámara. Con base en estos resultados, se plantea una propuesta de mejora que incluye optimización del aislamiento térmico, rediseño de la circulación interna del flujo y refuerzo de la estructura metálica y del revestimiento refractario.

La validación numérica confirma una reducción notable de las pérdidas energéticas, mayor uniformidad térmica y mejoras en la estabilidad mecánica del horno. Finalmente, se realiza un análisis económico que demuestra la viabilidad de implementar la solución propuesta, evidenciando beneficios operativos y una disminución del consumo energético.

Palabras clave: Horno industrial, alivio de tensiones, eficiencia térmica, pérdidas de calor, materiales refractarios, combustión de GLP, simulación CFD, análisis termográfico, balance energético, optimización estructural, métodos de volúmenes finitos, validación numérica, aislamiento térmico, diseño de ingeniería.

Abstract

This research proposes an improvement strategy for the stress-relief furnace (HAT) used by Tecnero S.A., a company dedicated to the manufacturing of liquefied petroleum gas (LPG) cylinders. The existing furnace exhibits significant thermal losses, structural degradation, and operational inefficiencies that affect the stability of the process, energy consumption, and long-term reliability of the equipment. The objective of this project is to enhance the thermal performance of the furnace and propose structural improvements supported by computational modeling and engineering validation.

The study begins with an extensive thermodynamic, materials, and combustion analysis to understand the furnace's operating conditions and identify the main sources of inefficiency. Field inspections, thermographic studies, and combustion-gas analyses are conducted to characterize the current state of the system. Numerical simulations using Computational Fluid Dynamics (CFD) complement the diagnostic process, allowing visualization of temperature fields, gas-flow behavior, and critical heat-loss zones.

Based on the diagnosis, a design improvement is proposed that includes modifications to the insulation system, optimization of the internal gas-flow dynamics, and structural reinforcement of the furnace casing. An energy balance is carried out to quantify the impact of the proposed changes, and numerical validation is performed to compare the improved model with the original configuration. The results indicate a reduction in thermal losses, improved temperature uniformity, and enhanced structural stability during operation.

Finally, an economic assessment evaluates the investment required for implementation and its operational benefits. The proposed solution offers a technically feasible and economically justified alternative to increase the efficiency, durability, and reliability of the stress-relief furnace used by Tecnero, contributing to safer and more sustainable industrial operations.

Keywords: Industrial Furnace, Stress Relief Heat Treatment, Thermal Efficiency, Heat Losses, Refractory Materials, Combustion Systems, GLP Furnace, CFD Simulation, Thermographic Analysis, Energy Balance, Structural Optimization, Finite Volume Method, Numerical Validation, Thermal Insulation, Engineering Design.

Índice

Resumen	v
Abstract	vi
1. Introducción	1
2. Planteamiento del problema	3
2.1. Objetivo General	3
2.2. Objetivos Específicos	3
2.3. Metodología de la Investigación	4
3. Marco Teórico	5
3.1. Introducción	5
3.2. Hornos industriales	5
3.2.1. Definición	5
3.2.2. Principio de operación	5
3.2.3. Clasificación	7
3.2.4. Hornos de combustión química	8
3.2.5. Demanda energética	9
3.3. Fundamentos termodinámicos en hornos industriales	10
3.3.1. Entalpía	10
3.3.2. Entropía	11
3.3.3. Exergía	11
3.3.4. Eficiencia	11
3.4. Materiales refractarios en la construcción de hornos industriales	13
3.4.1. Generalidades	13
3.4.2. Cerámicos refractarios	15
3.4.3. Aceros refractarios	19
3.4.4. Superalaciones y otras aleaciones avanzadas	22
3.5. Corrosión en hornos industriales	23
3.5.1. Oxidación	24

3.5.2.	Nitruración	24
3.5.3.	Carburización	24
3.5.4.	Metal Dusting	25
3.5.5.	Corrosión por halógenos y haluros	25
3.5.6.	Sulfuración	25
3.5.7.	Hot corrosion	26
3.6.	Contribución de los materiales en la construcción de hornos industriales . . .	26
3.7.	Consideraciones de diseño	27
3.8.	Sistemas de recuperación de calor	30
3.9.	Modelado y simulación	33
4.	Materiales y metodología	35
4.1.	Metodología del proceso	35
4.2.	Fase 1 - Caracterización	35
4.2.1.	Descripción general	35
4.2.2.	Análisis exploratorio de la condición física del equipo	39
4.2.3.	Análisis Termográfico	49
4.2.4.	Análisis de gases de combustión	54
4.2.5.	Evaluación Numérica mediante CFD	57
4.2.6.	Diagnóstico	66
4.3.	Fase 2 - Diseño	69
4.3.1.	Dimensionamiento del horno	70
4.3.2.	Combustión estequiométrica	72
4.3.3.	Balance energético	73
4.3.4.	Flujo másico de la mezcla	78
4.3.5.	Diseño de la chimenea	80
4.3.6.	Diseño de la cortina de aire	83
4.3.7.	Resumen de la propuesta de mejora	84
4.4.	Fase 3 - Validación y comparación numérica	85
4.4.1.	Estudio CFD del comportamiento térmico y fluidodinámico	85
4.4.2.	Resultado de la validación	88
4.5.	Fase 4 - Evaluación económica de la propuesta de mejora	90
4.5.1.	Alcance del análisis	90

4.5.2. Inversión inicial - CAPEX	90
4.5.3. Costos operativos - OPEX	90
4.5.4. Ahorros energéticos y económicos	91
4.5.5. Indicadores de rentabilidad	91
4.5.6. Valor Actual Neto - VAN	91
4.5.7. Tasa Interna de Retorno - TIR	93
4.5.8. Cálculo de la evaluación económica	93
5. Resultados y discusión	94
5.1. Análisis y discusión de los resultados del proceso de diseño y modelamiento .	94
5.2. Diseño final del horno de alivio de tensiones	101
5.3. Integración funcional del sistema	102
5.4. Sistema de evacuación de gases y mejoras estructurales	102
5.5. Cortina de aire	103
6. Conclusiones y Recomendaciones	103
6.1. Conclusiones	103
6.2. Recomendaciones	105
Referencias	112
ANEXOS	113
Anexo A: Tipos de hornos	114
Anexo B: Tipos de corrosión	116
Anexo C: Materiales refractarios	118
Anexo E: Cálculos	127
Anexo D: Planos	133

Índice de cuadros

1.	<i>Clasificación de los materiales según el grado refractario.</i>	14
2.	<i>Configuraciones más comunes de circulación en un intercambiador de calor, Mullinger y Jenkins (2014).</i>	31
3.	<i>Fases del proyecto y descripción.</i>	36
4.	<i>Características técnicas y condiciones de operación del sistema de combustión.</i>	40
5.	<i>Parámetros operativos de diseño del horno HAT proporcionados por TECNERO.</i>	71
6.	<i>Valores típicos para el diseño de chimeneas industriales según AENOR (2021).</i>	81
7.	<i>Comparación de desempeño térmico entre el horno inicial, la propuesta mejorada y la hipótesis esperada.</i>	89
8.	<i>Resumen de evaluación económica</i>	94
9.	<i>Comparativa de desempeño con y sin cortina de aire</i>	102
10.	<i>Tipos de hornos industriales. (Mullinger y Jenkins, 2014)</i>	114
11.	<i>Tipos de hornos industriales, continuación. (Mullinger y Jenkins, 2014)</i>	115
12.	<i>Tipos de hornos industriales, continuación. (Mullinger y Jenkins, 2014).</i>	116
13.	<i>Principales tipos de corrosión/degradación a altas temperaturas en hornos industriales.</i>	117
14.	<i>Principales tipos de corrosión/degradación a altas temperaturas en hornos industriales. Continuación</i>	118
15.	<i>Comparativa de materiales metálicos para uso en hornos industriales.</i>	119
16.	<i>Comparativa de materiales metálicos para uso en hornos industriales. Continuación.</i>	120
17.	<i>Comparativa de materiales metálicos para uso en hornos industriales. Continuación.</i>	121
18.	<i>Comparativa de materiales cerámicos refractarios y aislantes usados en hornos industriales.</i>	122
19.	<i>Comparativa de materiales cerámicos refractarios y aislantes usados en hornos industriales. Continuación.</i>	123
20.	<i>Tratamientos y recubrimientos protectores para materiales a alta temperatura.</i>	124
21.	<i>Continuación: Tratamientos y recubrimientos protectores para materiales a alta temperatura.</i>	125
22.	<i>Resultados del análisis de gases en diferentes puntos de la chimenea.</i>	126

23.	<i>Parámetros operativos del horno durante el proceso de alivio de tensiones. . .</i>	127
24.	<i>Dimensionamiento del horno.</i>	128
25.	<i>Balance energético del horno durante el proceso de alivio de tensiones. . . .</i>	128
26.	<i>Balance energético del horno durante el proceso de alivio de tensiones. Conti- nuación.</i>	129
27.	<i>Cálculo de la chimenea</i>	130
28.	<i>Cálculo de la chimenea. Continuación.</i>	131
29.	<i>Cálculo de la cortina de aire.</i>	132
30.	<i>Mano de obra estimada para la construcción de la propuesta</i>	134
31.	<i>Equipos, materiales y consumibles requeridos para la construcción de la propuesta</i>	135
32.	<i>Presupuesto para la construcción de la propuesta</i>	135

Índice de figuras

1.	<i>Aspectos de la investigación.</i>	4
2.	<i>Horno industrial: Principio básico de operación.</i>	6
3.	<i>Clasificación de hornos industriales.</i>	8
4.	<i>Fibra cerámica en rollo.</i>	16
5.	<i>Cryston® Cu Max Hot Face Bricks.</i>	17
6.	<i>Tipos de configuraciones de flujo en intercambiadores recuperativos.</i>	32
7.	<i>Esquema típico de horno con recuperador instalado en el conducto de salida de gases.</i>	33
8.	<i>Vista general del horno industrial.</i>	36
9.	<i>Cilindros al extremo de descarga, luego del proceso de alivio de tensiones.</i>	37
10.	<i>Cilindros al extremo de descarga, luego del proceso de quemado de pintura.</i>	38
11.	<i>Quemador Baltur, modelo BTG 11.</i>	39
12.	<i>Carcasa, parte superior del horno.</i>	41
13.	<i>Unión entre la carcasa y la riel de transporte de carga, parte superior del horno.</i>	42
14.	<i>Fractura en el cordón de soldadura.</i>	43
15.	<i>Fragilización del perfil metálico.</i>	44
16.	<i>Dilatación térmica excesiva.</i>	45
17.	<i>Estructura soportante, junto a la campana de la chimenea del extremo de descarga.</i>	46
18.	<i>Cilindro dentro de la cámara de combustión durante el proceso de quema de pintura.</i>	47
19.	<i>Grieta en el piso del horno.</i>	48
20.	<i>Desprendimiento de material aislante.</i>	49
21.	<i>Cámara termográfica TESTO 882 y filtro para altas temperaturas.</i>	50
22.	<i>Soporte de paso de la cadena transportadora, extremo de descarga.</i>	51
23.	<i>Chimenea, extremo de descarga.</i>	52
24.	<i>Chimenea, extremo de carga.</i>	53
25.	<i>Piso del horno, extremo de descarga.</i>	53
26.	<i>Piso del horno, bajo la cámara de combustión.</i>	54
27.	<i>Puntos de muestreo dentro de la sección transversal de la chimenea.</i>	55
28.	<i>Equipo de medición de gases BACHARACH PCA 400.</i>	55

29.	<i>Mallado del modelo tridimensional del horno en su estado inicial</i>	61
30.	<i>Convergencia de resultado después de 550 iteraciones</i>	62
31.	<i>HAT - Modelo tridimensional de la cámara de combustión.</i>	63
32.	<i>HAT - Flujo interno de gases de combustión.</i>	64
33.	<i>HAT - Distribución de temperatura en la cámara de combustión.</i>	65
34.	<i>HAT - Vectores de velocidad de los gases de combustión.</i>	66
35.	<i>Esquema representativo del HAT en su estado actual y la propuesta de mejora.</i>	69
36.	<i>Balance de calor en un horno de relevo de esfuerzos.</i>	74
37.	<i>HAT - Flujo interno de gases de combustión.</i>	86
38.	<i>HAT - Distribución de temperatura en la cámara de combustión.</i>	87
39.	<i>HAT - Vectores de velocidad de los gases de combustión.</i>	88
40.	<i>HAT - Flujo interno de gases de combustión, extracción forzada.</i>	96
41.	<i>HAT - Flujo interno de gases de combustión, extracción forzada.</i>	97
43.	<i>HAT - Vectores de velocidad en las aperturas del horno.</i>	99
44.	<i>HAT - Flujo interno de gases de combustión.</i>	100
45.	<i>HAT - Vectores de velocidad en la zona de precalentamiento.</i>	101

1. Introducción

En la industria metalmecánica, los procesos térmicos constituyen una etapa crítica para garantizar la integridad estructural y el desempeño funcional de piezas destinadas a aplicaciones industriales exigentes. Entre estos procesos, el alivio de tensiones es uno de los más relevantes, pues permite reducir las tensiones residuales generadas durante operaciones de conformado, soldadura o tratamientos previos, disminuyendo el riesgo de deformaciones, fallas prematuras y deterioro en servicio. Para llevar a cabo este proceso de forma controlada y eficiente, los hornos industriales deben operar bajo condiciones estables de temperatura, aislamiento térmico adecuado y una distribución uniforme del calor dentro de la cámara de tratamiento.

Tecnero S.A., empresa ecuatoriana dedicada a la fabricación de cilindros para GLP, utiliza un horno de alivio de tensiones que ha evidenciado problemas derivados de pérdidas de calor, degradación del revestimiento refractario, acumulación de daños estructurales y una eficiencia térmica limitada. Estas deficiencias repercuten directamente en el consumo energético, en la calidad final del producto y en los costos de operación. En un contexto de creciente demanda por procesos industriales más eficientes y sostenibles, resulta indispensable evaluar de manera rigurosa el estado actual del horno y plantear soluciones que permitan optimizar su funcionamiento.

El estudio que aquí se presenta aborda este desafío mediante una metodología integral que combina inspección de campo, análisis termográfico, mediciones de gases de combustión, modelado numérico con Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) y una evaluación estructurada de alternativas de mejora. El propósito es identificar las causas fundamentales del deterioro térmico y estructural del horno, diseñar propuestas basadas en principios de ingeniería térmica y de materiales, y validar su efectividad mediante simulaciones comparativas.

La propuesta resultante busca no solo incrementar la eficiencia energética del sistema, sino también prolongar la vida útil del equipo, mejorar la uniformidad térmica del proceso y asegurar condiciones de operación confiables para la producción de cilindros de GLP. Finalmente, se incluye un análisis económico que determina la viabilidad de la implementación, contribuyendo así al mejoramiento continuo de la infraestructura térmica de Tecnero y al fortalecimiento de su capacidad productiva.

Glosario

GLP	El Gas Licuado de Petróleo, conocido por sus siglas GLP, es un derivado del petróleo crudo, compuesto principalmente por propano y butano, que se licua fácilmente, de ahí su nombre. Estos se utilizan como insumos en los procesos de refinación y tienen aplicaciones en el ámbito doméstico e industrial. (Ortuño Arzate, 2009)
Horno	Estructura diseñada para calentar un producto o elemento a altas temperaturas de manera controlada con el objetivo de generar sobre estos reacciones químicas o físicas. (Mullinger y Jenkins, 2014)
Refractario	Material, ya sea de composición cerámica u otra, diseñado para resistir altas temperaturas y las condiciones del medio durante un período prolongado, manteniendo sus propiedades físicas y químicas idealmente inalterables. (Inoriza, 2003)
Combustión	Reacción química donde el combustible y el oxígeno se combinan a temperatura suficiente para generar calor útil en el proceso. (Mullinger y Jenkins, 2014)
HAT	Horno de Alivio de Tensiones.
CFD	Computational Fluid Dynamics.
impingement	Choque directo de un flujo o llama sobre una superficie.

2. Planteamiento del problema

Tecnología en Acero Tecnero S.A., conocida comercialmente como Tecnero, es una empresa ecuatoriana fundada en 2012, con sede en Cuenca, provincia del Azuay. Su actividad económica principal es la fabricación de recipientes de metal para gases comprimidos o licuados. (EMIS, 2025; SRI, 2025).

2.1. Objetivo General

Elaborar una propuesta para mejorar la eficiencia térmica del horno de alivio de tensiones en la empresa Tecnero y proponer una alternativa en el ámbito estructural, validando la misma con software de ingeniería.

2.2. Objetivos Específicos

- Determinar las fallas en el horno de alivio de tensiones y las causas que las provocan, a través de un estudio de campo y un análisis exhaustivo del proceso para establecer las condiciones que requieren mejora.
- Elaborar una propuesta para mejorar la eficiencia energética del horno durante su funcionamiento, así como la estabilidad y durabilidad de su estructura y revestimiento térmico.
- Evaluar la propuesta de mejora diseñada mediante un análisis numérico computacional que considere la eficiencia térmica del sistema, permita identificar los resultados y compararlos con la situación inicial del horno.
- Realizar un análisis de factibilidad económica mediante un presupuesto estructurado que incluya precios unitarios para definir la implementación de la propuesta.

2.3. Metodología de la Investigación

Para el desarrollo de la propuesta de mejora que disminuya el impacto generado por las pérdidas de calor sobre la estructura y operación del horno de alivio de tensiones se usará la metodología descrita en la siguiente figura:

Figura 1

Aspectos de la investigación.



Nota: En base a los procesos metodológicos desarrollados para la investigación, la figura especifica los tres aspectos que caracterizarán el desarrollo del tema planteado en el presente anteproyecto.

3. Marco Teórico

3.1. Introducción

En el sector metalúrgico, los hornos industriales cumplen un papel fundamental en procesos térmicos como: recocido, templado, revenido, normalizado, etc. Estos equipos funcionan a temperaturas extremadamente elevadas, donde factores como la eficiencia energética, la estabilidad térmica y la vida útil de los componentes internos son determinantes para garantizar una eficacia operativa óptima. Algunos de los elementos que entran en juego en su funcionamiento están relacionados con su operación y otros con su construcción y diseño como lo veremos más adelante.

3.2. Hornos industriales

3.2.1. Definición

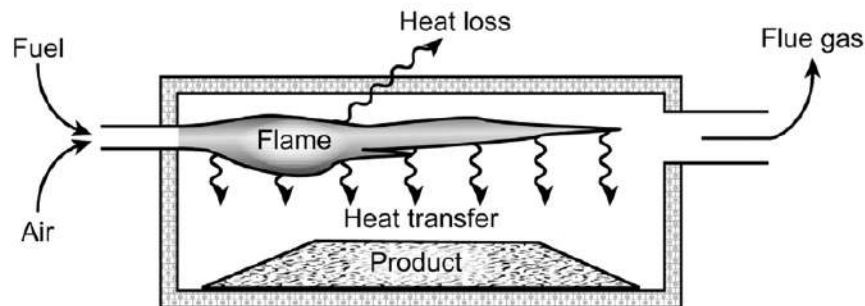
Un horno puede definirse como «una estructura cerrada diseñada para generar calor intenso». Su principal propósito es alcanzar temperaturas de procesamiento más elevadas que las posibles al aire libre, ya que hacerlo sin un recinto sería mucho menos eficiente, implicaría un mayor consumo de combustible y dificultaría el control del proceso. (CambridgeDictionary, s.f.; Mullinger y Jenkins, 2014)

3.2.2. Principio de operación

Tal como señala Mullinger y Jenkins (2014), parte del calor generado en el interior del horno es transferido al producto, lo demás se pierde a través del sumidero, residuos de material y el propio horno, para finalmente disiparse al exterior. La Figura 2 muestra la representación gráfica de este concepto.

Figura 2

Horno industrial: Principio básico de operación.



Nota: Transferencia de calor de un horno industrial. (Mullinger y Jenkins, 2014).

La relación entre el calor transferido al producto y el calor total generado al interior se define como eficiencia y viene dado por la siguiente expresión:

$$\eta = \frac{Q_p}{Q_s} \quad (1)$$

Donde: η eficiencia del horno, Q_p es el calor transferido al producto y, Q_s el calor total suministrado.

Si bien esta ecuación proporciona una expresión general de la eficiencia y es aplicable también a calderas, presenta varias limitaciones cuando se trata de evaluar con precisión la efectividad de un horno. (Mullinger y Jenkins, 2014)

Aunque el principio de operación se mantiene hasta la actualidad, según un análisis prospectivo de JPW Industrial Ovens & Furnaces (2024), las tendencias actuales en diseño y operación de hornos apuntan hacia un futuro más sostenible, digitalizado y personalizado. La evolución tecnológica de los hornos industriales está siendo impulsada por la necesidad de mejorar la eficiencia energética, reducir el impacto ambiental, reducir el riesgo para operarios, etc., mediante soluciones de automatización y, sin duda, de inteligencia artificial.

Una de las principales transformaciones es la integración de sistemas de control automatizados basados en sensores inteligentes y algoritmos adaptativos, que permiten una gestión térmica precisa en función del tipo de carga, del perfil de tratamiento requerido y de las condiciones ambientales. El uso de controladores PID autoadaptativos, sensores IoT y monitoreo en tiempo real permite reducir las desviaciones térmicas, minimizar los sobrecalentamientos y prolongar la vida útil del revestimiento refractario. (JPW Industrial Ovens & Furnaces, 2024)

El mismo artículo declara, según el autor, que otra tendencia clave es la adopción de plataformas de mantenimiento predictivo mediante inteligencia artificial, que analizan el historial térmico, los ciclos de uso y las condiciones de operación del horno para anticipar fallas en elementos críticos, como las zonas de paso de la carga, los sellos térmicos o los módulos de calefacción. Esta capacidad mejora la planificación del mantenimiento y evita costosas paradas no programadas.

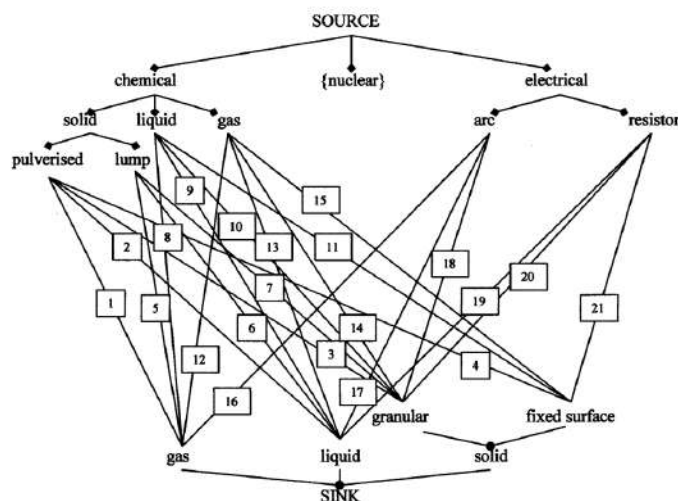
Finalmente JPW Industrial Ovens & Furnaces (2024) destaca una orientación hacia hornos modulares y personalizables, que se adaptan a los requerimientos específicos de cada proceso industrial, permitiendo una integración más flexible con líneas de producción automatizadas. Esto representa una oportunidad concreta para la propuesta de mejora del horno de TECNERO, optimizando su rendimiento según los volúmenes de carga, perfiles térmicos deseados y limitaciones espaciales del entorno industrial.

3.2.3. Clasificación

Existen innumerables formas de clasificar los hornos, ya sea según su forma, la industria en la que se utilizan o el tipo de producto que procesan. Sin embargo, una clasificación sencilla basada en los conceptos de transferencia de calor, específicamente el tipo de fuente de calor y el tipo de sumidero de calor. Mullinger y Jenkins (2014) representan esta clasificación en la Figura 3.

Figura 3

Clasificación de hornos industriales.



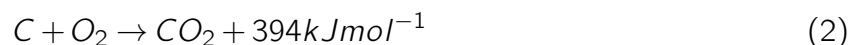
Nota: Cada casilla representa un tipo de horno, ligado tanto al tipo de fuente de calor «SOURCE», como a la manera que lo expulsa «SINK». Las Tablas 10 y 11 muestra la descripción de cada uno. (Mullinger y Jenkins, 2014)

3.2.4. Hornos de combustión química

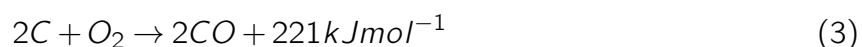
Siendo que el objeto de estudio es un horno de combustión química de GLP y emisión por chimenea, hablaremos de este proceso con mayor detalle en esta sección. Según Mullinger y Jenkins (2014), la reacción química responsable de generar el calor necesario para los tratamientos térmicos dentro del horno se denomina combustión y se define como un proceso de oxidación que involucra materiales combustibles, cuyo componente principal es el carbono y el hidrógeno. Esta reacción ocurre en presencia de oxígeno, conocido como comburente, generando una liberación significativa de calor. Este proceso ocurre en cuatro etapas, que son: mezcla, ignición, reacción química y emisión de residuos.

La tasa a la cual ocurre este fenómeno puede variar desde muy lenta a explosión instantánea. Es así que, el objetivo del diseñador es controlar esta tasa para obtener una temperatura estable y adecuada al proceso. Pero este no es el único reto, el diseñador también deberá

lograr que la combustión sea completa, generando como residuo de este proceso el dióxido de carbono, representado mediante la siguiente ecuación:



Por otro lado, la combustión incompleta da como resultado monóxido de carbono, donde la principal diferencia es reducir el calor generado por el combustible, alrededor de la mitad comparado con la combustión completa. Además, el monóxido de carbono es contaminante y un riesgo para la salud si es liberado directamente a la atmósfera. La ecuación que representa esta reacción viene dada por:



La combustión del monóxido de carbono es muy lenta; sin embargo, si radicales de hidrógeno están presentes en la flama, la tasa de combustión del monóxido de carbono incrementa significativamente.

El dispositivo que regula este proceso se denomina quemador y básicamente controla la mezcla de aire y combustible. En la mayoría de los sistemas de combustión, la masa de aire requerido para completar la combustión es al menos diez veces la del combustible. (Mullinger y Jenkins, 2014)

3.2.5. Demanda energética

Según Auces y Rodríguez (2003), el balance energético en un horno industrial se fundamenta en el principio de conservación de la energía, el cual establece que el calor que ingresa al sistema debe ser igual a la suma del calor que se libera, el que se acumula dentro del sistema y el que se pierde hacia el ambiente. Este análisis es esencial para optimizar la eficiencia del horno, minimizar pérdidas energéticas y reducir costos operativos.

Para realizar este balance, es necesario identificar y evaluar los elementos involucrados en la transferencia y pérdida de calor. Entre los principales factores se encuentran:

- El producto o pieza a tratar: Este constituye el objetivo principal del proceso, ya que debe absorber una cantidad específica de calor para alcanzar la temperatura requerida

para su tratamiento térmico. La eficiencia con la que el calor se transfiere al producto afecta directamente el rendimiento energético del horno.

- Las paredes del horno: Estas actúan como barreras térmicas, pero también representan una fuente de pérdidas de calor debido a la conducción y la radiación hacia el entorno exterior. La calidad del aislamiento térmico de las paredes es crucial para minimizar estas pérdidas.
- Las aberturas del horno: Los puntos de acceso, como puertas, chimeneas o ventanas, son vías por las cuales el calor puede escapar. La gestión adecuada de estas aberturas, como su diseño y el tiempo que permanecen abiertas, es clave para reducir fugas de calor innecesarias.

Implementar un balance energético detallado permite identificar áreas de mejora, como la necesidad de mejorar el aislamiento, optimizar los tiempos de operación, o incorporar tecnologías avanzadas de recuperación de calor. De esta forma, no solo se logra aumentar la eficiencia térmica del horno, sino que también se contribuye a reducir el impacto ambiental y los costos asociados al consumo de energía. (Auces y Rodríguez, 2003)

3.3. Fundamentos termodinámicos en hornos industriales

Según Pekař (2024) el estudio de los sistemas térmicos industriales, como los hornos de alivio de tensiones, los conceptos de entalpía, entropía y exergía resultan fundamentales para comprender y optimizar los procesos energéticos y, por ende, su eficiencia.

3.3.1. Entalpía

La entalpía (H) es una función de estado definida como la suma de la energía interna (U) y el producto de la presión (P) por el volumen (V) del sistema

$$H = U + P \times V \quad (4)$$

Este concepto es particularmente útil en procesos a presión constante, como los que se observan en equipos térmicos, ya que simplifica el análisis energético al representar la cantidad de calor intercambiado bajo dichas condiciones. Aunque no se puede medir directamente, su

utilidad reside en la forma en que permite relacionar energía interna y trabajo de expansión, facilitando los balances térmicos en condiciones industriales. (Pekař, 2024)

3.3.2. Entropía

La entropía (S) se define como una función de estado cuyo cambio está relacionado con el calor reversible y la temperatura absoluta mediante la expresión:

$$dS = \frac{\delta Q_{rev}}{T} \quad (5)$$

La entropía no es simplemente una medida de desorden, sino una herramienta matemática precisa que permite cuantificar la irreversibilidad de los procesos termodinámicos. Además, constituye un criterio objetivo para la dirección de los procesos y una medida de la energía que no puede transformarse en trabajo útil. (Pekař, 2024)

3.3.3. Exergía

La exergía se puede entender como la cantidad máxima de trabajo útil que un sistema puede realizar cuando se lleva al equilibrio con su entorno. Este concepto implica considerar la diferencia entre el estado actual del sistema y el estado muerto o de equilibrio ambiental, y puede expresarse como:

$$E_x = U + P \times V - T_0 \times S \quad (6)$$

donde T_0 es la temperatura del entorno (referencia externa). El análisis exergético es esencial en la ingeniería térmica moderna, ya que permite evaluar no solo cuánta energía fluye a través del sistema, sino cuánta de esa energía tiene la calidad suficiente para ser convertida en trabajo útil. Esto es especialmente relevante en la propuesta de mejora para el HAT de Tecnero, donde se busca minimizar las irreversibilidades internas (como gradientes térmicos elevados o pérdidas por gases de escape) para mejorar el rendimiento global del sistema. (Pekař, 2024)

3.3.4. Eficiencia

Mullinger y Jenkins (2014) establece que, la mayoría de los hornos tienen una eficiencia térmica baja, generalmente en el rango de 5% a 35%. Esto se debe a que la temperatura promedio de la carga en el horno es muy alta, lo que reduce la diferencia de temperatura entre la carga y la fuente de calor, lo que a su vez disminuye la transferencia de calor. La mayoría

de los sistemas de hornos aprovechan la recuperación de calor de los gases de escape, como veremos más adelante en la sección «Sistemas de recuperación de calor», y/o del producto para mejorar el rendimiento térmico. Estos sistemas de recuperación de calor generalmente incluyen el precalentamiento del aire de combustión y/o el precalentamiento de la carga. Por lo tanto, las eficiencias térmicas pueden mejorar considerablemente. Cuanto más baja es la eficiencia del horno, mayor es el potencial para recuperar calor. Para cualquier horno en operación estable, se puede realizar un balance de calor simple.

$$H_f = H_c + H_s + H_g \quad (7)$$

Donde: H_f : Calor suministrado por el combustible, H_c : Calor aprovechado por la carga, H_s : Pérdidas de calor en la estructura del horno, H_g : Pérdidas por gases de combustión.

En función del tipo de combustible, el calor suministrado por el quemador puede calcularse con la siguiente ecuación:

$$H_f = Q_f \times CV \quad (8)$$

Donde: Q_f : Flujo de combustible, CV : Capacidad calorífica del combustible.

El calor aprovechado por la carga se puede determinar de la siguiente manera:

$$H_c = Q_c \times (Cp_c \times (T_c - T_a) + H_r) \quad (9)$$

Donde: Q_c : Flujo de la carga, Cp_c : Calor específico de la carga, T_c : Temperatura de la carga, T_a : Temperatura ambiente, H_r : Reacción de energía.

Las pérdidas por la estructura del horno ocurren debido a que el calor se transfiere por conducción a través de las paredes y las aberturas. Luego, por convección y radiación, desde el exterior hacia la atmósfera. Estas pueden ser estimadas mediante:

$$H_s = A_i \times k \times (T_c - T_a) \quad (10)$$

$$H_s = A_o \times (b \times (T_c - T_a) + \sigma \times \varepsilon \times (T_o^4 - T_a^4)) \quad (11)$$

Donde: A_i : Área de las paredes internas, A_o : Área de las paredes externas, k : Conductividad térmica de las paredes, b : Coeficiente de transferencia de calor por convección, T_i : Temperatura

de la cara caliente de la carcasa, T_o : Temperatura de la cara fría de la carcasa, ε : Coeficiente de emisividad de las paredes, σ : Constante de Stefan-Boltzmann.

Por último, el calor expulsado por los gases de combustión se calcula mediante:

$$H_g = Q_g \times C_{p_g} \times (T_g - T_a) \quad (12)$$

Donde: Q_g : Flujo de los gases de combustión. C_{p_g} : Calor específico de los gases de combustión. T_g : Temperatura de los gases de combustión a la salida. (Mullinger y Jenkins, 2014)

3.4. Materiales refractarios en la construcción de hornos industriales

3.4.1. Generalidades

Los materiales que constituyen un horno industrial en las áreas críticas, donde la temperatura y las condiciones son extremas, deben ser seleccionadas cuidadosamente, dado que el desempeño térmico y estructural depende en gran medida de la calidad, diseño e interacción funcional de materiales refractarios y aislantes térmicos que conforman su revestimiento interno. En los últimos años, empresas como Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories (2024b) han desarrollado tecnologías avanzadas en materiales de aislamiento térmico específicamente diseñadas para ambientes extremos como los encontrados en hornos de reducción, tratamiento térmico y siderurgia primaria.

La ingeniería de refractarios evolucionó significativamente, pasando de considerar estos materiales como barreras térmicas pasivas a diseñarlos como sistemas activos que interactúan con el entorno operativo para optimizar su comportamiento térmico, mecánico y químico. En este contexto, los autores introducen el concepto de «refractarios in situ», entendidos como aquellos que desarrollan parte de su funcionalidad durante el servicio, mediante reacciones físicas o químicas con las escorias, atmósferas o cargas del proceso. Este enfoque no solo prolonga la vida útil del revestimiento, sino que representa una estrategia inteligente para la autorregeneración de barreras protectoras, una idea central para entornos industriales de alta exigencia térmica. (Lee y Moore, 1998)

En este contexto, por ejemplo, las aleaciones hierro-cromo adquieren gran importancia por su resistencia superior a la corrosión a alta temperatura. Esta resistencia se atribuye a la formación

de capas pasivas de óxido en la superficie de las aleaciones, formando películas protectoras densas y estables, especialmente bajo condiciones de oxidación inicial. (Sánchez Pastén, 2016)

Lee y Moore (1998) plantea beneficios como:

- Formación natural y controlada de capas protectoras que reducen el desgaste por corrosión y ataque químico.
- Prolongación de la vida útil del revestimiento.
- Mayor capacidad de adaptación a ambientes térmicos agresivos.
- Reducción de la necesidad de mantenimientos frecuentes.

Antes de estudiar su composición, Inoriza (2003) cita la normativa *DIN 51060:2000-06: Norma para materiales refractarios* para definir los rangos a los que un material es considerado como refractario o altamente refractario. La Tabla 1 muestra dicha clasificación.

Tabla 1

Clasificación de los materiales según el grado refractario.

Propiedad	Cono Seger	Temperatura
Resistente al fuego	<17	<1.500 °C
Refractario	≥ 17	≥ 1.500 °C
Altamente refractario	≥ 16	≥ 1.800 °C

Nota. DIN 51060:2000-06: Norma para materiales refractarios.

Los materiales cerámicos son los más utilizados para aislamiento térmico, los podemos encontrar en el mercado como: ladrillos, morteros y fibras cerámicas. Estos compuestos muestran una resistencia significativa a las altas temperaturas, se caracterizan por presentar bajas conductividades térmicas (0.15 a 0.35 W/m·K), alta estabilidad dimensional y resistencia química frente a atmósferas reductoras y escorias alcalinas. Esto permite minimizar las pérdidas energéticas hacia el entorno y garantizar perfiles de temperatura más uniformes dentro de la cámara del horno. A diferencia de los revestimientos densos tradicionales, que poseen una masa térmica elevada y una respuesta lenta ante cambios de carga térmica, los nuevos materiales de baja densidad y baja inercia, permiten rampas térmicas más rápidas, que se traduce en ciclos térmicos optimizados, reducción de tiempos de calentamiento y enfriamiento, y una disminución del consumo energético global del sistema. (Lee y Moore, 1998)

Los procesos de fabricación e instalación de cada uno son bastante complejos; en consecuencia, cada uno se utiliza en condiciones específicas.

3.4.2. Cerámicos refractarios

Fibras cerámicas : Cuentan con un proceso de fabricación sencillo, no requieren cocción, poseen una baja inercia térmica, facilitan el control de temperatura del horno, entre otros. Es así que, las fibras cerámicas como se muestra en la Figura 4, son usadas ampliamente en la industria de los hornos industriales como barreras térmicas secundarias o para rellenos de expansión controlada. La evolución de las fibras cerámicas en el aislamiento térmico incorpora estructuras de aislamiento térmico triples que combinan CA6 ($CaO6Al_2O_3$), fibras biosolubles (AES por sus siglas en inglés de Alkaline Earth Silicate Wool) y paneles de alta aislación, obteniendo valores de conductividad térmica en rangos de 0.25 a 1.7 W/mK. (Lu, 2011; Schmidtmeier, Kockegey-Lorenz, Buhr, Schnabel, y Dutton, 2012)

Figura 4

Fibra cerámica en rollo.



Nota: KINGWOOL® Presentación: 0.6m x 5m en 25mm. El silicato de aluminio, también conocido como manta de fibra cerámica, está fabricado a partir de fibras cerámicas. Utilizando técnicas de soplado y hilado de alto rendimiento, estos productos ofrecen un rendimiento de aislamiento superior, flexibilidad y resiliencia. Están disponibles en una variedad de combinaciones de composición química, densidad y espesores. (AislamientoIndustrial, 2024).

La fibra resiste bien la oxidación (ya es óxido) pero puede deteriorarse por ataque químico si hay vapores agresivos, vapores ácidos la degradan, fundiéndola en puntos. También la fibra sufre encogimiento después de muchas exposiciones a temperatura máxima, perdiendo espesor y sus propiedades aislantes con el tiempo. (AislamientoIndustrial, 2024; Lu, 2011; Schmidtmeier y cols., 2012).

Ladrillos y morteros refractarios : Los ladrillos prensados y refractarios densos de alúmina y magnesia, se utilizan en zonas de impacto directo o abrasión severa. Concretos monolíticos moldeables (sin juntas ni ladrillos) con bajo o ultra bajo contenido cementante, ideales para geometrías complejas o zonas de difícil acceso. Además de los monolíticos castables, tenemos los gunitables o proyectados y los autonivelantes, usados para revestimientos rápidos y homogéneos.(Lee y Moore, 1998)

Figura 5

Cryston® Cu Max Hot Face Bricks.



Nota: Ladrillo refractario Cryston® Cu Max, diseñado para resistir la oxidación y el ataque químico de óxidos de cobre, sin ser humectado por el metal fundido. Su elevada resistencia mecánica a altas temperaturas, junto con su tolerancia al impacto y la abrasión, lo convierten en una opción ideal para revestimientos expuestos. (Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories, 2024a).

Ladrillos refractarios de aluminosilicato : Son los ladrillos tradicionales de arcilla, sílica, chamota, alúmina, entre otros. Contienen fases de $Al_2O_3 - SiO_2$ (mulita, corindón, cristobalita). Su resistencia térmica es elevada, soportan temperaturas de 1500 °C dependiendo del porcentaje de óxido de aluminio (Al_2O_3). En hornos de alivio de tensiones (atmósfera limpia), suelen durar muchos años con mínimos problemas, limitándose su degradación a alguna fisura por choque térmico si se calienta/enfría muy rápido. Pero en incineradores con gases corrosivos, estos refractarios pueden ser atacados químicamente: por ejemplo, vapores de sodio y azufre reaccionan con refractarios el óxido de aluminio entre 600–700 °C formando fases fundidas de bajo punto de fusión que corroen el material refractario. (JUCOS, 2025).

Un caso típico es la formación de compuestos alcalinos (silicatos de sodio o potasio) que disuelven la matriz de sílice a ~800°C. También los vapores de cloruros alcalinos pueden

penetrar y causar hinchamiento o ruptura. Por ello, la vida de un revestimiento de ladrillo aluminoso en un incinerador de residuos puede verse acortada por la química de las cenizas y gases. Para mitigarlo, se emplean a veces ladrillos con aditivos especiales o se realiza una capa de recubrimiento protector (por ejemplo, wash coat de material resistente a álcalis). En hornos de quema de pintura, la carga química tal vez sea menor que en incineradores de basura municipales, pero si la pintura contiene aditivos como pigmentos con sodio, potasio, cloro y/o PVC en recubrimientos vinílicos, el efecto corrosivo sobre refractarios de sílica-alúmina será similar.

Refractarios básicos (magnesia, cromo) : Son ladrillos a base de óxido de magnesio MgO , a veces combinados con óxido de cromo Cr_2O_3 (magnesia-cromo). Tienen excelente resistencia a escorias de naturaleza básicas (por ejemplo, aquellas que contienen óxido de calcio CaO) y a ataques de compuestos sulfatados. En incineradores de residuos peligrosos o hornos rotativos de cemento (donde hay álcalis y sulfuros), se usan refractarios de magnesia para la sección de más ataque, ya que el óxido de magnesio ofrece mejor resistencia a la corrosión por sulfatos mejor que la alúmina. Sin embargo, estos materiales no se usan típicamente en hornos de pequeña escala como uno de pintura, debido a su costo y dificultad de manejo, además el óxido de cromo implica preocupaciones ambientales. Podrían considerarse en casos donde el ambiente operativo es extremadamente sulfuroso. (CNRH Refractories, 2024; Harbison Walker Refractories Company, 2005; Jucos Refractory, 2024).

Refractarios especiales (zirconia, carburo de silicio) : En aplicaciones muy exigentes, se emplean materiales cerámicos avanzados. Por ejemplo, zirconia u óxido de circonio (ZrO_2) y las composiciones a base de alúmina-zirconia-sílice se usan en incineradores de sulfuro en la industria química según RS New Refractory (2024) debido a su sobresaliente resistencia química y térmica. La zirconia es prácticamente inmune a la mayoría de ataques químicos pero muy costosa. El carburo de silicio (SiC) se usa en forma de placas o tubos, tiene excelente resistencia al choque térmico y buena resistencia a gases corrosivos, aunque puede oxidarse lentamente formando sílice. Componentes cerámicos como tubos radiantes de carburo de silicio (SiC) o quemadores de cerámica porosa son opciones en hornos donde los metálicos convencionales no ofrecen una vida útil adecuada. (CNRH Refractories, 2024; Harbison Walker Refractories Company, 2005; Jucos Refractory, 2024).

Las Tablas 18 y 19 muestran una comparativa de materiales cerámicos refractarios y aislantes usados en hornos industriales.

3.4.3. Aceros refractarios

Los aceros inoxidable son la elección estándar para ambientes de temperatura moderada, gracias a su capa protectora de óxido de cromo. Existen varias subfamilias con diferente comportamiento a 650 °C – 700 °C, entre ellas tenemos:

Inoxidables austeníticos comunes (serie 300) : Son los más utilizados en aplicaciones industriales generales. AISI 304/304H, 316/316L, 321 (estabilizado con Ti), 347 (Nb) tienen buena resistencia a la oxidación hasta ~800 °C en aire según Cedinox (2025). Estudios comparativos indican que 316L puede ser más resistente a la corrosión que el 304H a 700 °C en ciertas condiciones gracias a su molibdeno, Moreno Franco (2007). Sin embargo, estos aceros presentan limitaciones:

- **Fragilización por sigma:** Si permanecen cientos de horas en el rango de 600 °C a 800 °C, formarán fase sigma y/o carburos que fragilicen la matriz según SteelPRO Group (2024). Esto es crítico en hornos de servicio continuo, tras un tiempo, piezas como soportes o pernos de 304/316 pueden volverse quebradizos.
- **Sensibilización:** A 650 °C ocurre precipitación de carburos Cr_{23}C_6 en bordes de grano si el acero no es de bajo carbono o estabilizado, resultando en susceptibilidad a corrosión intergranular posterior.
- **Oxidación acelerada con contaminantes:** En presencia de azufre o cloruros, la protección de 304/316 se ve superada, el 304L sufre fuerte corrosión por picaduras y desprendimiento de óxidos, mientras aceros más aleados resisten mejor, Bajt Leban y cols. (2023)

En los tratamientos de alivio de tensiones, aceros inoxidable comunes pueden funcionar bien estructuralmente (ej. para revestir el interior del horno, bandejas, racks de piezas, etc.), brindando resistencia al óxido y evitando contaminación por cascarilla. En hornos de incineración con gases corrosivos, en cambio, estos grados básicos podrían ser marginales – por ejemplo,

un 304/316 en contacto con humo de pintura con trazas de azufre y cloro puede corroerse. En tales casos se recurre a aleaciones tipo 300 de alta aleación.

Inoxidables austeníticos de alta temperatura (alta aleación) : Destacan grados como AISI 309 (23%Cr, 13%Ni), 310/310S (25%Cr, 20%Ni) y 314 (25%Cr, 20%Ni, 2%Si), diseñados específicamente para servicio continuo a temperaturas elevadas. Gracias a su mayor contenido de cromo, generan películas de óxido más estables que los 304/316, permitiendo su uso hasta ~1100 °C en aire, Cedinox (2025).

Por ejemplo, el acero **310S** puede operar alrededor de 1000 °C en atmósfera oxidante, formando una capa adherente de Cr_2O_3 ; el **314** incorpora silicio 1.5–3%, que mejora adicionalmente la integridad de la capa de óxido y la resistencia a la oxidación cíclica. En ambientes con sulfuros o sales, estas aleaciones también muestran mejor desempeño: estudios de corrosión cíclica con NaCl a 650 °C revelan que 309, 310S y 314 sufren mucha menos pérdida de material que 304L, Bajt Leban y cols. (2023).

La alta cantidad de cromo ayuda contra la sulfidación y cloruros, y el alto níquel contrarresta la fragilización (además de favorecer la adherencia del óxido), Cedinox (2025).

No obstante, incluso estos inoxidables «resistentes al calor» pueden formar fase sigma tras exposiciones prolongadas en 700 °C (especialmente 314 debido a su alto porcentaje de cromo), por lo que se recomienda evitar estancarlos mucho tiempo en el rango crítico SteelPRO Group (2024). Su costo es mayor que 304/316, pero suelen ser la opción preferida para equipos de proceso que operan sobre los 600 °C y no se quiere recurrir aún a «superalaciones».

En hornos de incineración, componentes internos como rieles, soportes de quemadores o partes de la cámara de combustión suelen fabricarse en aleaciones tipo 310S o 309 para resistir la combinación de calor y corrosión.

En hornos de tratamiento (alivio de tensiones), las muflas o retortas muchas veces se construyen en 310S, ya que proporciona larga vida a 700°C en aire antes de oxidarse significativamente.

Aceros inoxidables ferríticos (ej. 430, 446) : Tienen solo cromo, sin níquel y son magnéticos. Algunos grados ferríticos altos en Cr pueden soportar bien la oxidación: por ejemplo, 446 con ~25%Cr resiste hasta ~1100°C similar al 310S y tiene la ventaja de no formar fase sigma tan fácilmente (por su microestructura ferrítica). Asimismo, los ferríticos no sufren sensibilización al carbono. Sin embargo, presentan inconvenientes: son menos resistentes mecánicamente a altas temperaturas y pueden volverse frágiles (fragilización a 475°C y crecimiento de grano). El grado 446 tiende a fragilizarse y suele ser difícil de soldar, aun así, estos se emplean en aplicaciones como tubos radiantes o retenciones de resistencias. (Nickel Institute, 2003; Outokumpu, 2013; SteelPro Group, 2024).

Inoxidables martensíticos (como 410, 420, etc.) : Generalmente no son apropiados para 700°C, ya que pierden su templabilidad y, básicamente, revenidos a esa temperatura quedan como ferríticos pobres en aleación (limitados a ~600°C y con poca ductilidad). Un martensítico especial tipo Jethete o similar podría usarse para ciertos pernos que necesiten alta resistencia a temperatura moderada, pero en general no son materiales de construcción de hornos de 700 °C. (Nickel Institute, 2003; Outokumpu, 2013; SteelPro Group, 2024).

En resumen, los aceros inoxidables austeníticos (especialmente los de alta aleación Cr-Ni) constituyen la columna vertebral de las construcciones metálicas internas de hornos de 650-700 °C. Sus pros incluyen: excelente resistencia a la oxidación en aire, buena ductilidad (mientras no fragilicen por sigma), fácil fabricación/soldabilidad y costo relativamente razonable en comparación con superaleaciones. Sus contras: susceptibilidad a ciertos ataques (sulfidación, cloruros) si la aleación no es suficiente, posibilidad de fragilización a largo plazo y resistencia mecánica limitada en régimen de *creep* (para cargas elevadas a 700°C, a veces se requiere refuerzos o aleaciones más fuertes). (Nickel Institute, 2003; Outokumpu, 2013; SteelPro Group, 2024).

Las Tablas 15, 16 y 17 presentan un resumen comparativo de los principales metales refractarios disponibles en el mercado.

3.4.4. Superalaciones y otras aleaciones avanzadas

Cuando las condiciones exceden las capacidades de los aceros inoxidable (por ejemplo, ambientes con corrosión extremadamente severa por químicos, o requerimientos de resistencia mecánica a alta temperatura), se recurre a superaleaciones de base níquel, hierro-níquel o cobalto. Estas aleaciones –inicialmente desarrolladas para turbinas de gas y procesos petroquímicos, mantienen su integridad a temperaturas donde el acero falla. Para hornos que operan a 650–700 °C, pueden considerarse las siguientes:

Aleaciones Fe-Ni-Cr (serie 800) : Un ejemplo destacado es Incoloy 800H/800HT (Fe-32Ni-21Cr, con Ti/Al). Esta aleación fue concebida para usos continuos a 600–800 °C con buena estabilidad microestructural, resiste la formación de sigma gracias a su alto porcentaje de níquel y excelente resistencia a la oxidación y carburización. De hecho, 800H se utiliza en reformadores y tuberías de craqueo a ~760 °C. En un horno industrial, 800H podría usarse para componentes estructurales que sostengan carga a 700 °C o para tuberías de intercambio de calor expuestas a gases sulfurosos. Su costo es mayor que un inoxidable 310, pero ofrece mayor resistencia a la fluencia «*creep*» y durabilidad en presencia de sulfuros. Otras aleaciones similares incluyen 330 (Fe-35Ni-19Cr, usado en canastos de tratamiento térmico) y 310MoLN (austenítico especial con Ni y Mo mejorados). (Grosenick, 2003; Nickel Institute, 2003; Outokumpu, 2013; SteelPro Group, 2024).

Aleaciones totalmente base Níquel : Aquí entran las familias Inconel (600, 601, 625, 690, 693, etc.), Haynes, Hastelloy, etc. Para ~700°C, por ejemplo, Inconel 600 (Ni-72, Cr-15, Fe-8) ofrece excelente resistencia a oxidación y cloruros y moderada resistencia a sulfuros; Inconel 601 añade Al para formar una capa protectora de Al_2O_3 , siendo muy resistente a oxidación/sulfidación hasta 1200°C; Inconel 625 (Ni-61, Cr-21, Mo-9, Nb) resiste bien oxidación y corrosión en general, aunque su óxido puede ser perjudicial a temperaturas superiores a 800 °C). (Grosenick, 2003; Nickel Institute, 2003; Outokumpu, 2013; SteelPro Group, 2024).

Estas superaleaciones muestran prácticamente ninguna formación de fase sigma en 700°C y conservan ductilidad. Además, tienen alta resistencia mecánica incluso en zona de fluencia

«creep». Su principal desventaja es el costo (varias veces el de un inoxidable) y la menor disponibilidad/formabilidad en comparación con aceros comerciales. En un horno de incineración de pintura, podría justificarse su uso en áreas críticas: por ejemplo, en quemadores o boquillas de inyección si están sometidas a ataque químico, o en anclajes que sobresalen al interior (los anclajes metálicos que sostienen refractario suelen corroerse rápido; usar Inconel puede extender su vida considerablemente). En hornos de alivio de tensiones (ambiente limpio), normalmente no es necesario llegar a estos materiales tan costosos, pues un acero 310S suele ser suficiente; las superaleaciones se reservarían si se requiriera una vida extremadamente larga sin mantenimiento. (Grosenick, 2003; Nickel Institute, 2003; Outokumpu, 2013; SteelPro Group, 2024).

Aleaciones base Cobalto: Menos comunes en hornos, pero aleaciones tipo Haynes 188 (Co-Ni-Cr-W) o Stellite (Co-Cr con carburo) poseen gran resistencia a sulfidación y estabilidad a alta temperatura. Se utilizan más en turbinas o válvulas calientes. En un contexto de horno podrían emplearse en piezas especiales que demanden altísima resistencia al desgaste a 700 °C (p.ej. guías expuestas a fricción a alta temperatura). (Grosenick, 2003; Nickel Institute, 2003; Outokumpu, 2013; SteelPro Group, 2024).

En resumen, las superaleaciones brindan la máxima resistencia a la corrosión a 650–700 °C, a costa de precio. Son prácticamente inmunes a la fragilización sigma, soportan mejor la sulfidación tipo II (gracias a su elevado contenido de cromo y aluminio) y toleran ambientes carburizantes donde los aceros fallan según. Sus usos típicos en hornos incluyen: componentes de los quemadores, recipientes para atmósferas controladas, anclajes o sujetadores internos de recubrimientos refractarios y cualquier punto de calor local muy intenso.

3.5. Corrosión en hornos industriales

El diseño y procesamiento de metales avanzados requiere un control riguroso tanto de la composición como de la estructura superficial y volumétrica del material, debido a que estos factores determinan sus propiedades mecánicas y de servicio. Para lograr estructuras específicas, los tratamientos térmicos industriales utilizan hornos de alta temperatura, donde los equipos están expuestos a gases corrosivos. Estos ambientes favorecen la degradación

acelerada de materiales estructurales, lo que hace indispensable considerar la corrosión a alta temperatura como un factor crítico en el diseño y operación de equipos térmicos y de procesamiento de metales. (Sánchez Pastén, 2016)

3.5.1. Oxidación

La oxidación es el fenómeno más relevante en la corrosión a altas temperaturas. Cuando los metales y sus aleaciones se exponen a elevadas temperaturas en presencia de aire o en atmósferas altamente oxidantes —como las generadas en procesos de combustión con exceso de oxígeno o aire—, ocurre este tipo de reacción. Dichos ambientes son comunes en hornos de tratamiento térmico. Para un mejor entendimiento, las Tablas 13 y 14 resumen las características de cada atmósfera, los rangos de temperatura asociados, las aleaciones recomendadas para operar en esas condiciones y las reacciones químicas que definen los mecanismos de oxidación. (Sánchez Pastén, 2016)

3.5.2. Nitruración

La nitruración puede ocurrir cuando los materiales se encuentran expuestos a atmósferas de aire o de combustión que contienen nitrógeno. Aunque la oxidación es el proceso predominante en estas condiciones, la nitruración aparece cuando las capas de óxidos formadas en algunas aleaciones no logran brindar una protección duradera. Incluso durante la oxidación en aire existe la posibilidad de que el nitrógeno penetre en el material y se formen nitruros internos, principalmente de cromo. Esta formación de nitruros se facilita a temperaturas superiores a 1100 °C y está influenciada por un tiempo de inducción que depende directamente de la temperatura: a mayor temperatura, menor será el tiempo requerido para iniciar el proceso. (Sánchez Pastén, 2016)

3.5.3. Carburización

La carburización es un mecanismo de degradación que afecta a metales y aleaciones cuando estos son expuestos a altas temperaturas en atmósferas ricas en monóxido de carbono CO, metano CH₄, etano o propano. Aunque la formación de óxidos representa, en general, la fase más estable bajo estas condiciones, la difusión de carbono a través de la capa de óxido permite la formación de carburos internos. Este fenómeno compromete las propiedades mecánicas de las aleaciones, particularmente al inducir fragilización y otros modos de deterioro

estructural. Para controlar este fenómeno, se emplean atmósferas controladas mediante gases endotérmicos ricos en hidrocarburos, que permiten minimizar la actividad del carbono disponible. (Sánchez Pastén, 2016)

3.5.4. Metal Dusting

El metal dusting representa una forma severa y catastrófica de degradación por carburización. Este fenómeno ocurre a temperaturas intermedias en atmósferas que contienen mezclas de hidrógeno H_2 , monóxido de carbono CO , dióxido de carbono CO_2 y otros hidrocarburos, bajo condiciones de alta actividad de carbono ($a > 1$). Se caracteriza por una rápida pérdida de material metálico, ya sea por formación de picaduras o por corrosión uniforme, generando la fragmentación del componente en partículas finas de polvo metálico. Este tipo de deterioro ha sido ampliamente reportado en procesos industriales. La comprensión y control de este fenómeno resultan fundamentales para garantizar la integridad y la vida útil de los equipos sometidos a condiciones extremas de servicio. (Sánchez Pastén, 2016)

3.5.5. Corrosión por halógenos y haluros

Se produce cuando ciertos metales reaccionan con gases halogenados, formando haluros volátiles que pueden sublimar a bajas temperaturas en ambientes industriales que involucran cloro o ácido clorhídrico. Son comunes en la metalurgia, la industria química y en sistemas de generación de energía a partir de residuos, donde por la acción de incineradores y quemadores industriales, el HCl presente en la atmósfera, en combinación con oxígeno, libera cloro elemental que forma cloruros metálicos que reaccionan con humedad u oxígeno para formar óxidos, liberando nuevamente cloro, en un proceso denominado oxidación activa. (Sánchez Pastén, 2016)

3.5.6. Sulfuración

La sulfuración constituye un proceso de degradación crítica en materiales expuestos a ambientes industriales de alta temperatura. El azufre, presente de forma natural como impureza en combustibles fósiles, se libera durante la combustión y puede reaccionar con el oxígeno atmosférico formando dióxido de azufre y trióxido de azufre en condiciones oxidantes. Aunque las atmósferas oxidantes son generalmente menos agresivas que las reductoras, su efecto corrosivo puede intensificarse por la presencia de contaminantes como sodio, potasio y cloro,

capaces de generar vapores de sales que se depositan sobre superficies metálicas, promoviendo ataques acelerados por sulfuración. La cinética del proceso está controlada tanto por el transporte de especies en fase gaseosa como por las reacciones heterogéneas en la superficie metálica, comprometiendo de manera significativa la integridad estructural y la vida útil de los materiales. (Sánchez Pastén, 2016)

3.5.7. Hot corrosion

Durante los procesos de combustión en turbinas de aviación, el azufre contenido en el combustible reacciona con el cloruro de sodio presente en el ambiente, generando sulfato de sodio. Este compuesto se deposita en las zonas de mayor temperatura, como los álabes y las hélices, provocando un fenómeno de oxidación acelerada que compromete la integridad de los materiales expuestos. La clasificación de la hot corrosion depende del intervalo de temperatura de operación. Tipo I, se presenta entre 800-950 °C. Tipo II, se manifiesta en un intervalo de temperatura entre 670-750 °C. (Sánchez Pastén, 2016)

3.6. Contribución de los materiales en la construcción de hornos industriales

En su artículo, Lee y Moore (1998) plantea que la combinación de estos materiales permite diseñar y construir estructuras multicapa con una secuencia funcional bien definida: una capa interior resistente al choque térmico y al desgaste mecánico, seguida de un núcleo estructural refractario y finalmente una capa aislante que reduce la pérdida térmica.

Los materiales aislantes descritos complementan directamente el desempeño del proceso, tal como lo documenta Lee y Moore (1998), su composición reaccionar químicamente con el entorno durante la operación térmica del horno, lo que permite la formación de capas protectoras que mejoran su desempeño y extienden su vida útil.

En este contexto, Lee y Moore (1998) mantiene que un sistema de aislamiento térmico eficiente cumple un papel fundamental al mantener temperaturas internas óptimas, favoreciendo el desarrollo adecuado de las reacciones in situ dentro del revestimiento refractario. Además, permite evitar gradientes térmicos indeseados que podrían comprometer la expansión controlada de los materiales y afectar la distribución homogénea del calor en el interior del horno. Este control térmico contribuye también a la reducción de tensiones estructurales en las zonas de

transición térmica, lo cual es clave para preservar la integridad del sistema refractario a lo largo de su operación.

Finalmente, Lee y Moore (1998) traduce estas mejoras térmicas y estructurales en ventajas operativas cuantificables, tales como:

- Mayor vida útil del revestimiento refractario.
- Reducción de paradas no programadas por mantenimiento.
- Disminución del consumo energético global del horno.
- Reducción del peso estructural, especialmente beneficiosa en hornos móviles o modulares.
- Mejora del comportamiento térmico en ciclos repetitivos, aspecto crítico en hornos de tratamiento térmico, como aquellos utilizados para alivio de tensiones.

3.7. Consideraciones de diseño

Para diseñar y operar hornos industriales de 650–700°C con máxima vida útil, se sugieren las siguientes recomendaciones prácticas en cuanto a selección de materiales y diseño:

Elegir aleaciones metálicas apropiadas para partes calientes : Emplear aceros inoxidables de alta resistencia a la oxidación (ej. 310, 309 o aleaciones equivalentes) para cámaras y componentes internos expuestos al calor. Estas aleaciones minimizan la formación de escamas y reducen la corrosión respecto a aceros convencionales. (Burja, Šetina Batič, Žužek, y Balaško, 2023).

Si se anticipa presencia de azufre, cloro u otros agentes corrosivos en los gases, considerar aleaciones aún más resistentes (Inconel 600/601, Hastelloy X, etc.) en esos puntos críticos, pese a su mayor costo, pues evitarán corrosión rápida y frecuentes reemplazos. (Burja, Šetina Batič, Žužek, y Balaško, 2022).

Asimismo, evitar el uso de materiales conocidos por fragilizarse: por ejemplo, no usar aceros dúplex o ferríticos en la cámara a 700 ° C, ya que su tenacidad se verá comprometida por precipitación de fases frágiles, acorde a International Molybdenum Association (IMOA) (2012). En su lugar, optar por aleaciones totalmente austeníticas o níquel-base que conservan ductilidad a esas temperaturas.

Proteger superficies metálicas contra corrosión : Siempre que sea factible, aplicar recubrimientos protectores a los metales expuestos. Opciones incluyen aluminizado o siliconado en aceros que crea una capa superficial de óxido de aluminio y óxido de silicio que ofrece resistencia a la oxidación y sulfidación. También se puede usar pinturas refractarias protectoras. Por ejemplo, elementos de acero al carbono en zonas calientes pueden recubrirse con un aluminizado de difusión para servir como barrera anti-oxidación/sulfidación, ampliando su vida útil en ambientes de combustión. (Schmitz, 2023).

Inertización : En hornos de tratamiento térmico se puede introducir una atmósfera controlada (nitrógeno, argón) durante el mantenimiento de temperatura, reduciendo el oxígeno disponible que cause oxidación de componentes y piezas. Esto no elimina la necesidad de materiales resistentes, pero reduce la severidad de la oxidación y carburización en servicios prolongados.

Seleccionar refractarios según la atmósfera : Para hornos de quema de recubrimientos, elegir refractarios con alta pureza y adecuados para entornos químicos variables. Refractarios de alta alúmina, mullita o incluso basados en cromo-alúmina tienen mejor resistencia a ácidos que los de sílice y cal. Si se anticipa la presencia de cloruros, pueden usarse ladrillos o concretos refractarios resistentes a químicos, existen refractarios catalogados como “acid-resistant” para hornos donde se libera ácido clorhídrico. (Ebben y Carlson, 2023)).

Evitar refractarios con componentes fácilmente atacables : por ejemplo, refractarios con alto contenido de cal libre serán vulnerables al dióxido de azufre SO_2 formando sulfato de calcio expansivo $CaSO_4$ y, aquellos con mucha sílice libre serán vulnerables al óxido de sodio y trióxido de azufre (Na_2O y SO_3 respectivamente) formarán nefelina. (Villalba Weinberg, Varona, Chaucherie, Goeuriot, y Poirier, 2017).

Recubrimiento superficial en zonas donde se use fibra cerámica : «Coating» tipo silicato de circonio o arcilla refractaria puede reducir su exposición directa a gases corrosivos y prolongar

su vida. Además, dimensionar correctamente el espesor del aislamiento (sea fibra o ladrillo) para asegurar que la temperatura en la cara fría del refractario mantenga a los metales estructurales por debajo de su límite de fluencia y corrosión. Idealmente por debajo de 300 °C en el acero de la carcasa.

Diseñar juntas de expansión : La dilatación térmica a 700 °C son significativas. Es crucial prever juntas de expansión en los revestimientos refractarios entre, ladrillos o paneles de fibra, para que el material pueda expandirse sin agrietarse. Igualmente, los componentes metálicos largos (raíles, marcos) deben tener holgura o expansiones calculadas para no inducir tensiones excesivas al calentarse. Para minimizar choques térmicos, se recomienda controlar las rampas de calentamiento y enfriamiento dentro de rangos seguros del material; por ejemplo, no calentar ni enfriar más rápido de lo que el refractario puede soportar sin fisurarse. En hornos intermitentes, la fibra cerámica ayuda en este aspecto por su tolerancia al choque térmico. (Tavira, 2023).

Castables y ladrillos requieren mayor precaución, un precalentamiento lento luego de reparaciones o paros prolongados evita la grieta por vapor, si quedara humedad atrapada, extendiendo la vida del «*lining*».

Mantenimiento periódico y monitoreo : Implementar inspecciones rutinarias del horno para identificar signos tempranos de degradación. Por ejemplo, medir temperaturas de la pared externa «*hot spots*» puede revelar secciones donde el aislamiento interno se deterioró. Un punto caliente localizado sugiere pérdida de espesor o fisuras en el refractario que deben repararse antes de que causen daños mayores. (Ebben y Carlson, 2023).

Asimismo, inspeccionar visualmente el interior en paros programados: buscar oxidación excesiva de piezas metálicas (escamas sueltas), deformaciones, grietas en refractarios o acumulación de depósitos corrosivos. Remover las escorias o cenizas de pintura quemada que se acumulen en el piso u otras superficies, ya que pueden contener sales corrosivas que atacan tanto metales como refractarios si permanecen durante los ciclos. En el caso de fibras cerámicas, sustituir completamente los módulos de fibra después de cierto tiempo (por ejemplo, 5–7 años según el uso) o cuando se evidencie cristalización y desprendimiento. Es preferible un reemplazo total del revestimiento de fibra cuando envejece, en lugar de parches, ya que la fibra nue-

va se encogerá y dejará huecos en unión con la vieja, exacerbando fugas de calor. (Cantú, 2024).

Control de la atmósfera de combustión : En hornos de incineración de recubrimientos, asegurar una combustión lo más completa posible de los vapores orgánicos dentro de una cámara secundaria (postcombustión) o mediante suficiente suministro de aire, de forma que la atmósfera en la cámara primaria no sea excesivamente reductora. Esto no solo reduce emisiones contaminantes sino que evita condiciones de alta actividad de carbono que puedan carburizar tuberías o rejillas internas. Mantener el horno ligeramente por encima del punto de rocío de ácidos al enfriar antes de abrir, para que no condensen ácidos en las paredes. Por ejemplo, después de quemar pinturas con compuestos de azufre, realizar un enfriamiento controlado con ventilación que expulse el dióxido de azufre antes de que formen ácido sulfúrico H_2SO_4 en superficies frías. (Van den Berg, 2015).

En conclusión, la durabilidad de un horno industrial a 650–700°C depende de una selección cuidadosa de materiales resistentes a los mecanismos de degradación prevalentes (oxidación, corrosión por gases, fragilización, etc.) y de un diseño que acomode los esfuerzos térmicos. Combinando aceros inoxidable o superaleaciones en las partes metálicas internas, con revestimientos refractarios óptimos para la atmósfera de proceso, y aplicando buenas prácticas operativas, es posible lograr un rendimiento confiable y prolongar la vida útil del equipo incluso bajo condiciones severas de temperatura y corrosión. Cada horno debe evaluarse de manera integral (materiales, atmósfera y ciclo de operación) para implementar las estrategias más adecuadas que maximicen su resistencia a la degradación.

3.8. Sistemas de recuperación de calor

Los procesos de industrialización son las actividades con mayor consumo de energía y generan emisiones perjudiciales para el medio ambiente. Los tratamientos térmicos del acero y hierro son especialmente ineficientes en términos energéticos, por lo que mejorar la eficiencia energética no solo representa una estrategia significativa para reducir las emisiones de CO₂, sino que también incrementa la competitividad económica al disminuir los costos energéticos. Para abordar diversas perspectivas, existen modelos y tecnologías recientes de eficiencia térmica que pueden aplicarse para minimizar las pérdidas de calor en los hornos industriales como IRFs

por sus siglas en inglés, Industrial Reheating Furnaces. (Zhao y cols., 2021).

Las configuraciones más comunes de los recuperadores de calor se clasifican en función del sentido de circulación de los fluidos involucrados en el proceso de transferencia térmica. Cada disposición presenta ventajas y limitaciones particulares en términos de eficiencia y pérdidas de carga, siendo su objetivo fundamental maximizar el aprovechamiento del calor residual de los gases de combustión con el mínimo detrimento en la presión del sistema. La Figura 6 y la Tabla 2 presentan las configuraciones más representativas empleadas en aplicaciones industriales.

Tabla 2

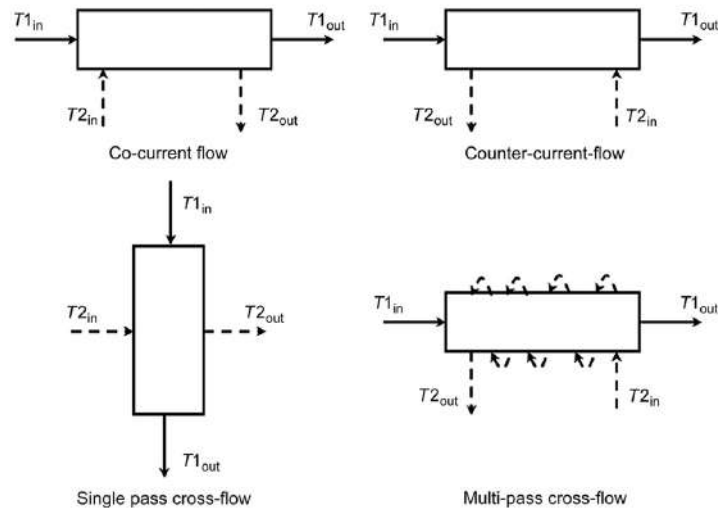
Configuraciones más comunes de circulación en un intercambiador de calor, Mullinger y Jenkins (2014).

Tipo de flujo	Descripción	Características principales
Flujo paralelo	Ambos fluidos se desplazan en la misma dirección, ingresando y saliendo por extremos opuestos del intercambiador.	Presenta una alta diferencia de temperatura al inicio, la cual disminuye rápidamente. Su eficiencia térmica es limitada en comparación con otros arreglos.
Flujo contracorriente	Los fluidos circulan en direcciones opuestas a lo largo del intercambiador, lo que maximiza el gradiente térmico efectivo.	Ofrece mayor eficiencia térmica y permite alcanzar temperaturas de salida del fluido frío cercanas a la de entrada del fluido caliente.
Flujo cruzado	Las corrientes se cruzan perpendicularmente, típicamente en intercambiadores de tubos y aletas o en matrices compactas.	Compromete eficiencia y tamaño, siendo común en recuperadores de gases de hornos industriales y sistemas HVAC.
Flujo mixto o multietapa	Combina flujos en paralelo y contracorriente, o los dispone en secciones segmentadas.	Permite optimizar gradientes térmicos, reducir tensiones mecánicas y controlar la expansión térmica en aplicaciones de alta temperatura.

Nota. Tomado de la Figura 9.9 del Mullinger y Jenkins (2014), donde se ilustran las configuraciones de flujo más empleadas en recuperadores y economizadores industriales.

Figura 6

Tipos de configuraciones de flujo en intercambiadores recuperativos.

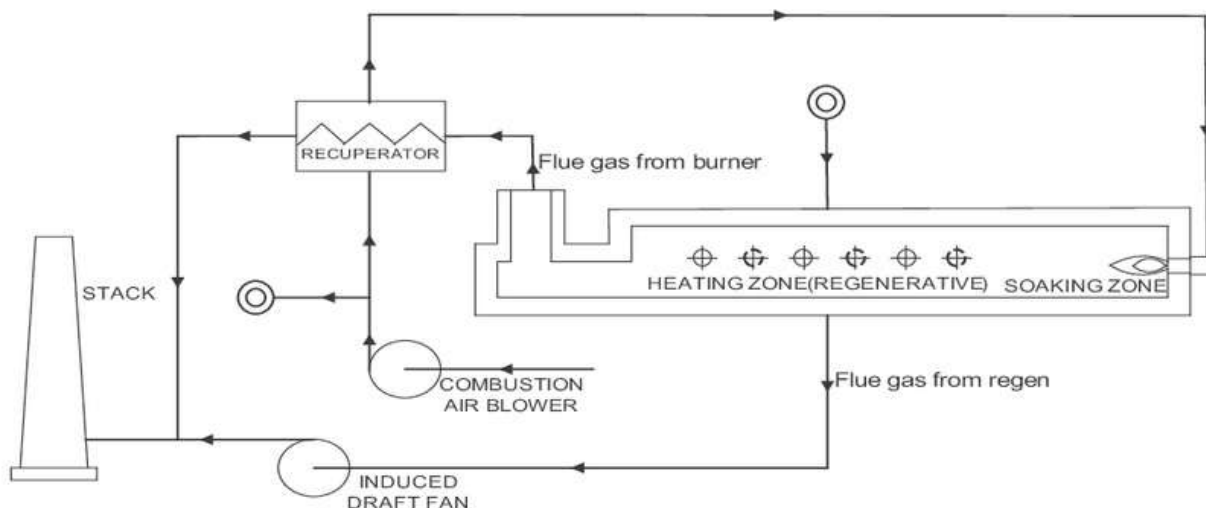


Nota. Tomado de Mullinger y Jenkins (2014).

En un sistemas de recuperación de calor industrial, como muestra la Figura 7, los principales componentes (horno, recuperador, ventiladores, quemadores y chimenea) operan de manera integrada para optimizar el uso de la energía térmica. Los gases de combustión generados en el horno son conducidos hacia el recuperador, donde transfieren parte de su energía al aire de combustión antes de ser evacuados por la chimenea. Este proceso permite reducir el consumo de combustible y mejorar la eficiencia global del sistema. Los ventiladores aseguran el flujo adecuado de aire y gases, mientras que los quemadores mantienen la temperatura requerida para el proceso de calentamiento, cerrando así el ciclo térmico del sistema.

Figura 7

Esquema típico de horno con recuperador instalado en el conducto de salida de gases.



Nota. Tomado de Manatura y Tangtrakul (2010).

3.9. Modelado y simulación

Los programas para analizar la dinámica de fluidos computacional (CFD) son desarrollados para estudiar la transferencia de calor en sistemas industriales, con el objetivo de prever su comportamiento al ser sometidos a las condiciones definidas por el proceso. Esto permite garantizar la resistencia suficiente para operar frente a cargas térmicas cíclicas extremas, a menudo durante años sin necesidad de reemplazo. La simulación es una herramienta clave para optimizar el rendimiento, seleccionar los materiales más adecuados y prever la durabilidad y vida útil del sistema.

A continuación, se presentan algunos de los programas CFD más reconocidos para análisis térmico, junto con sus principales características y ventajas distintivas.

- Ansys Fluent, reconocido por su capacidad para simular flujos de fluidos complejos y procesos térmicos, Ansys Fluent ofrece una amplia gama de modelos físicos y químicos, permitiendo simulaciones precisas en aplicaciones industriales. (Ansys, s.f.)

- Altair CFD, este software proporciona herramientas avanzadas para el análisis de fluidos y térmico, incluyendo capacidades de simulación de dinámica de fluidos computacional (CFD) y análisis térmico. (Altair, s.f.)
- SimScale, basado en la nube, SimScale permite realizar simulaciones de CFD y análisis térmico sin necesidad de hardware especializado, facilitando el acceso a la simulación para equipos de diseño de cualquier tamaño. (SimScale, s.f.)
- OpenFOAM, software de código abierto, OpenFOAM ofrece una amplia gama de herramientas para simulaciones de CFD y análisis térmico, siendo altamente personalizable y adecuado para investigaciones avanzadas. (OpenFOAM, s.f.)
- COMSOL Multiphysics, este software permite realizar simulaciones de CFD y análisis térmico, integrando múltiples físicas en un solo modelo, lo que es ideal para aplicaciones que requieren un enfoque multifísico. (COMSOL, s.f.)

La simulación CFD nos permite, como lo hizo Filipponi y cols. (2016) analizar una operación típica de inserción/extracción en un horno industrial, el cual mostró que la cantidad de energía perdida durante esta maniobra, luego de 10 minutos, es de 5606 MJ, siendo el principal factor contribuyente el flujo de calor por convección, con un valor de 5252 MJ.

Por otra parte, un enfoque tradicional suele basarse en métodos analíticos y experimentales más simplificados. Estos métodos se centran en aproximaciones, o modelos empíricos. En muchos casos, se utilizan tablas o gráficos predefinidos para determinar las pérdidas de energía o las distribuciones térmicas, lo que puede limitar la capacidad para analizar con precisión sistemas complejos con geometrías y condiciones variables. El método tradicional a menudo requiere más pruebas experimentales para validar los modelos, lo cual puede ser costoso, demandante de tiempo y de difícil ejecución.

4. Materiales y metodología

4.1. Metodología del proceso

Se estructuró el proyecto en cuatro fases que permiten abordar el análisis del horno de alivio de tensiones desde una perspectiva integral. Cada fase cumple un propósito específico dentro del proceso investigativo: iniciar con la caracterización del equipo, formular una solución basada en criterios de ingeniería, validar numéricamente el desempeño de la propuesta y, finalmente, evaluar su viabilidad económica. La Tabla 3 resume estas fases y presenta una representación gráfica que facilita su comprensión dentro del marco metodológico del estudio.

4.2. Fase 1 - Caracterización

4.2.1. Descripción general

El equipo objeto de estudio corresponde a un horno industrial de alimentación continua, abierto, destinado al tratamiento térmico de cilindros de acero para almacenamiento de gas licuado de petróleo (GLP) (Figura 8). La carga, constituida por los cilindros, es transportada a través del horno mediante una cadena transportadora de movimiento continuo, la cual recorre longitudinalmente la cámara de combustión, permitiendo la entrada y salida de los cilindros a través de aberturas dispuestas en ambos extremos de la estructura.

En el Anexo 6.2, Plano 1/3 se presenta el plano esquemático del horno industrial objeto de estudio. Este esquema permite identificar la disposición general de los componentes principales del sistema, incluyendo la cámara de combustión, el sistema de alimentación continua, los conductos de evacuación de gases y los elementos estructurales clave.

Tabla 3
Fases del proyecto y descripción.

Fase	Descripción	Representación gráfica
Fase 1: Caracterización	Análisis físico y técnico del horno: medidas, materiales y condiciones de operación.	
Fase 2: Diseño	Desarrollo de la propuesta de mejora en función de los hallazgos encontrados en su operación inicial.	
Fase 3: Validación	Validación y comparación numérica con la situación inicial y alternativas comerciales.	
Fase 4: Evaluación económica	Propuesta económica para la implementación e instalación de la propuesta de mejora.	

Figura 8
Vista general del horno industrial.

Nota. Imagen del horno de alivio de tensiones de TECNERO durante su operación.

Figura 9

Cilindros al extremo de descarga, luego del proceso de alivio de tensiones.



Nota. La imagen muestra la salida de los cilindros de la cámara de combustión durante la operación de alivio de tensiones.

El horno ha sido diseñado para ejecutar dos procesos térmicos diferenciados:

1. El quemado de pintura sobre los cilindros, a una temperatura de operación controlada de 650 °C (Figura 9).
2. El tratamiento de alivio de tensiones residuales generadas durante los procesos de conformado y soldadura, mediante exposición a una temperatura de 700 °C (Figura 10).

Figura 10

Cilindros al extremo de descarga, luego del proceso de quemado de pintura.



Nota. La imagen muestra la salida de los cilindros de la cámara de combustión durante la operación de quema de pintura.

El sistema de calefacción del horno está conformado por cuatro quemadores Baltur S.p.A. (2025), modelo BTG 11 que operan con gas licuado de petróleo (GLP), compuesto en un 75% de propano y un 25% de butano. La regulación de la temperatura se realiza mediante un sistema de control manual/automático Figura 11. Para el monitoreo y seguridad del proceso, se implementa un esquema de medición redundante, compuesto por dos termopares y un pirómetro óptico, que permite que un operario verifique de manera continua la temperatura de operación dentro de la cámara de combustión.

Figura 11

Quemador Baltur, modelo BTG 11.



Nota. Quemador de gas monobloque de una etapa (on/off), diseñado para aplicaciones industriales y comerciales que requieren una potencia térmica moderada.

Con el fin de documentar de manera sistemática las particularidades del equipo en estudio, la Tabla 4 presenta una síntesis de las principales características físicas, los componentes funcionales y las condiciones de operación del horno de tratamiento térmico. La información incluye las dimensiones internas y externas de la cámara de combustión, el tipo de revestimiento térmico empleado, la capacidad de carga máxima, así como los parámetros asociados al sistema de combustión, ventilación y extracción de gases. Adicionalmente, se especifican los tiempos de ciclo de los distintos tratamientos, junto con el régimen de operación típico del horno.

4.2.2. Análisis exploratorio de la condición física del equipo

La exploración física constituye la primera fase del proceso de evaluación del estado actual del horno y permite identificar, de manera directa, indicios de deterioro mecánico, fallas en el aislamiento térmico y anomalías asociadas a las condiciones de operación. Este análisis se realizó mediante una observación sistemática de la estructura externa e interna del equipo, considerando aspectos como deformaciones en la carcasa, fisuras visibles en el revestimiento refractario, presencia de corrosión, puntos de fuga de calor y acumulación de residuos producto

Tabla 4

Características técnicas y condiciones de operación del sistema de combustión.

Sección	Descripción
1. Características físicas	
1.1 Cámara de combustión	Dimensiones internas útiles: Ancho 1300 mm, Alto 1000 mm, Largo 5600 mm.
1.2 Carcasa	Dimensiones externas aproximadas: Ancho 1500 mm, Alto 1550 mm (sin base), Largo 5600 mm.
1.3 Revestimiento térmico	Piso: Mortero refractario (espesor: 100 mm). Paredes: Fibra cerámica (espesor: 200 mm). Techo: Fibra cerámica (espesor: 200 mm).
1.4 Capacidad de carga	Máxima: 14 unidades. Peso: 200 kg dentro de la cámara de combustión.
2. Componentes principales	
2.1 Sistema de quemadores	Combustible: GLP (75 % Propano, 25 % Butano). Regulación: Manual/Automática. Potencia máxima: 99 kW. Potencia mínima: 48 kW.
2.2 Sistema de ventilación	Ingreso de aire natural, por las aperturas del horno y forzada, por los ventiladores de cada quemador
2.3 Sistema de extracción de gases	Natural, por tiro térmico mediante dos chimeneas.
3. Condiciones de operación	
Duración del proceso	Alivio de tensiones: 11.2 minutos. Quemado de pintura: 6.6 minutos.
Tipo de operación	Discontinuo e intermitente: 8 horas por día, 4 veces por semana

de la combustión. La información recopilada en esta fase sirve como línea base para orientar las etapas posteriores del análisis, definir los componentes críticos y priorizar las intervenciones necesarias dentro del diseño de la propuesta de mejora.

Los hallazgos observados durante el análisis macroscópico del horno fueron los siguientes:

- **Reparaciones:** En la Figura 12 se observan reparaciones mediante la colocación de parches metálicos en la chapa de la carcasa. Indicando antecedentes de fatiga térmica.

Figura 12

Carcasa, parte superior del horno.



Nota. La imagen muestra reparaciones hechas sobre la chapa metálica al de perforarse, presuntamente por exceso de temperaturas.

- **Fracturas en la estructura externa:** La Figura 13 muestra daños en una de las uniones soldadas entre los paneles de la carcasa. Una discontinuidad crítica en la línea de unión, correspondiente a una fisura en el cordón de soldadura, la cual se extiende hacia la superficie del material base. Este tipo de fisura representa una falla estructural que compromete la integridad mecánica y la estanqueidad térmica de la envolvente del horno.

Figura 13

Unión entre la carcasa y la riel de transporte de carga, parte superior del horno.



Nota. El cordón presenta una configuración irregular, con presencia de porosidad, salpicaduras metálicas y acumulaciones de escoria.

- **Fracturas en la estructura interna:** La Figura 14 y la Figura 15 muestran fracturas en los cordones de soldadura de los soportes internos, destinados a sostener la carcasa y el manto cerámico. Esto evidencia una ejecución deficiente del cordón de soldadura en las uniones entre componentes estructurales. Se observa una soldadura de geometría irregular, con secciones de fusión incompleta y acumulación desigual del material de aporte, lo cual compromete la continuidad mecánica de la unión. Se identifican defectos superficiales como socavados, porosidad, salpicaduras metálicas y presencia de escoria adherida, los cuales son indicativos de un procedimiento de soldadura inadecuado o una deficiente preparación de la superficie.

Figura 14

Fractura en el cordón de soldadura.



Nota. Imagen tomada durante el mantenimiento correctivo del manto cerámico.

Figura 15

Fragilización del perfil metálico.



Nota. Imagen tomada durante el mantenimiento correctivo del horno, en ella se observa una grieta en el borde del perfil metálico y la unión con la chapa metálica.

- **Deformación plástica permanente:** Dilatación térmica excesiva, especialmente en elementos de soporte del manto cerámico (Figura 16).

Figura 16

Dilatación térmica excesiva.



Nota. Pandeo de la platina que soporta la estructura del manto cerámico. Este componente fue reemplazado por pernos durante el mantenimiento correctivo que se llevaba a cabo en ese momento.

- **Corrosión y degradación química:** La Figura 17 muestra la estructura soportante, conformada por perfiles metálicos de acero al carbón. En ella se observa el deterioro y signos de corrosión severa, particularmente en las zonas expuestas a mayores gradientes térmicos, donde la protección superficial ha fallado debido a la pérdida del recubrimiento anticorrosivo, dejando el sustrato metálico vulnerable a la oxidación.

Figura 17

Estructura soportante, junto a la campana de la chimenea del extremo de descarga



Nota. La imagen muestra señales de corrosión severa en la estructura soportante del horno debido a exposición de altas temperaturas.

- **Oxidación por halógenos y haluros:** Las características observadas en las superficies externas, especialmente la formación de depósitos pulverulentos y la pérdida acelerada del revestimiento protector, sugieren la acción de compuestos halogenados como HCl, los cuales pueden estar presentes como contaminantes en el GLP o ser introducidos por residuos en la carga del horno.
- **Sulfuración:** Las áreas con oxidación oscura, escamada y de apariencia mate, especialmente en componentes estructurales del horno, coinciden con el patrón típico de ataque por compuestos sulfurosos (SO_2 , SO_3). La combustión incompleta y la acumulación de residuos con azufre favorecen este tipo de ataque.
- **Hot corrosion (corrosión caliente):** Las zonas con decoloración metálica azulada combinada con escamas no adheridas podrían estar asociadas a la acción de sales fundidas (como Na_2SO_4 o residuos clorurados). Este fenómeno es característico de hornos con depósitos salinos en presencia de vapor y contaminantes del combustible.
- **Carburación localizada:** No se descarta la presencia de carburación superficial en

zonas internas, especialmente en aquellas con depósitos oscuros tipo hollín o carbonilla, producto de la combustión incompleta. Aunque no es concluyente por inspección visual, su ocurrencia en áreas con circulación restringida de aire lo hace altamente probable.

- **Fallas en materiales refractarios:** El revestimiento cerámico del piso presenta fisuras de distintas longitudes y profundidades en el mortero refractario, atribuibles a tensiones térmicas cíclicas, gradientes de temperatura mal distribuidos y posibles deficiencias en el anclaje o el diseño de juntas de dilatación térmica (Figura 19 y 20).
- **Combustión incompleta:** Durante la operación de quema de pintura hay emisión de llama amarilla directamente desde la superficie del cilindro expuesto al interior de la cámara de combustión (véase Figura 18). Este comportamiento constituye una señal clara de combustión incompleta de los compuestos orgánicos contenidos en el recubrimiento superficial del cilindro.

Figura 18

Cilindro dentro de la cámara de combustión durante el proceso de quema de pintura.



Nota. Presencia de llama amarilla durante el proceso térmico

La llama amarilla se genera por la presencia de partículas incandescentes de carbono (hollín) que no han sido completamente oxidadas, lo cual ocurre típicamente cuando los

gases volátiles emitidos por la descomposición de la pintura no disponen de suficiente oxígeno ni temperatura para completar su combustión.

La combustión incompleta de pinturas puede liberar monóxido de carbono (CO), hidrocarburos no quemados (HC), compuestos clorados o sulfurosos, y residuos carbonosos que deterioran la calidad del ambiente térmico e interfieren con los procesos de transferencia de calor y control de temperatura.

La presencia de productos como HCl o SO₂ derivados de pigmentos, plastificantes o aditivos de la pintura puede inducir fenómenos de corrosión por halógenos, sulfuración y potencial carburación localizada, afectando tanto la integridad del cilindro como la durabilidad del revestimiento interno del horno.

El hollín generado puede depositarse en las superficies expuestas, dando lugar a procesos de disgregación superficial metálica conocidos como metal dusting, especialmente en zonas donde la temperatura oscile entre 500 y 800 °C.

Figura 19

Grieta en el piso del horno.



Nota. El piso del horno presenta grietas de consideración, evidenciando posibles deterioros estructurales asociados a esfuerzos térmicos o mecánicos repetitivos.

Figura 20

Desprendimiento de material aislante



Nota. En la parte posterior del horno se encuentra el desprendimiento del material aislante, posiblemente por dilatación o carga excesiva en esta zona.

4.2.3. Análisis Termográfico

Para complementar el análisis exploratorio, se realizó un levantamiento termográfico del horno en condiciones de operación estable, utilizando una cámara termográfica marca TESTO (Figura 22), modelo 882, con una sensibilidad térmica de 50 °K a 30 °C y un rango espectral de 8–14 μm . El rango de medición para alta temperatura es de 350 a 550 °C, con una exactitud de $\pm 3\%$ del valor medido.

Figura 21

Cámara termográfica TESTO 882 y filtro para altas temperaturas.



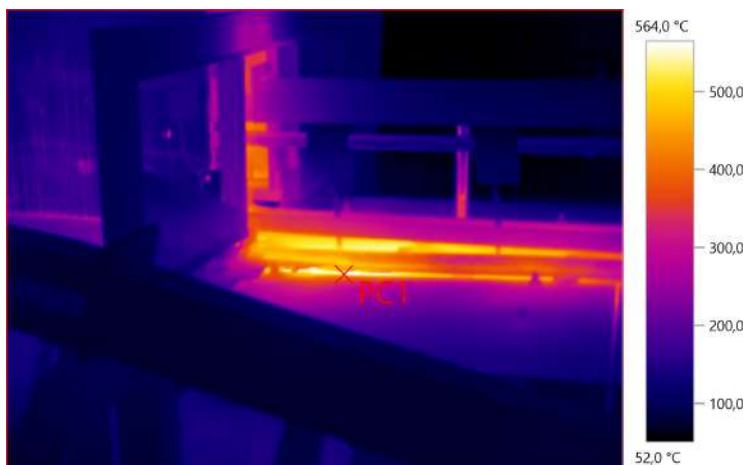
Nota. Cámara termográfica Testo 882 utilizada para la inspecciones térmica del horno durante su operación junto al filtro de medición de altas temperaturas 350-550 °C.

El análisis termográfico permitió identificar componentes operando fuera de sus rangos térmicos esperados, así como puntos calientes y fugas de calor hacia el exterior del horno:

- **Sobrettemperatura en la superficie externa del horno:** Se La temperatura superficial registrada varió entre 52 °C y 560 °C (Figura 22), mientras que la cámara de combustión operaba a 670 °C. Esta diferencia evidencia pérdidas térmicas significativas a través de la carcasa del horno.

Figura 22

Soporte de paso de la cadena transportadora, extremo de descarga.



Nota. Imagen termográfica de la carcasa a lo largo de la guía de desplazamiento de la cadena transportadora.

Desde el punto de vista técnico, la presencia de temperaturas tan elevadas en componentes estructurales externos es indicativa de un aislamiento térmico ineficiente o deteriorado. En hornos industriales con aislamiento adecuado mediante ladrillos refractarios o fibras cerámicas, se espera que la temperatura superficial de la carcasa se mantenga por debajo de los 80 °C (Mullinger y Jenkins, 2014). La magnitud del gradiente térmico observado sugiere que el sistema de aislamiento ha perdido su capacidad para contener el calor generado.

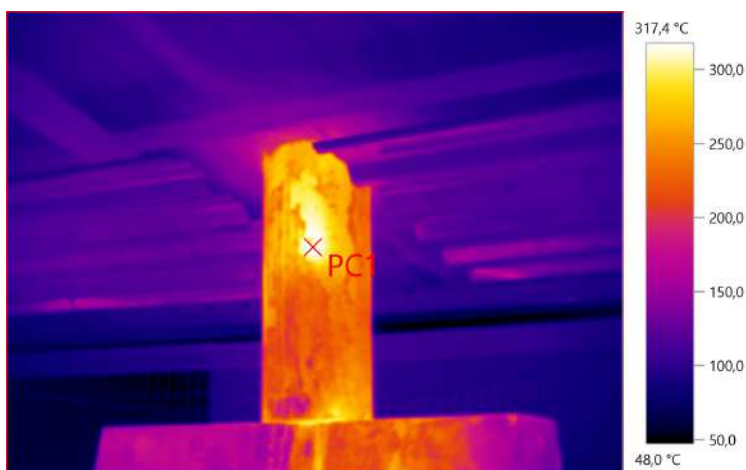
Esta transferencia térmica no deseada genera riesgos tanto estructurales como operativos. Por un lado, las altas temperaturas sobre la carcasa y guías metálicas promueven fenómenos de expansión térmica desigual, fatiga térmica y oxidación acelerada, lo que podría ocasionar pandeos, pérdida de alineación, atascamiento en la cadena de transporte, entre otros.

- **Degradación en la chimenea del lado de descarga:** En la chimenea ubicada en el lado de descarga se registró una temperatura promedio de 244 °C, con puntos específicos que alcanzaron hasta 317 °C (Figura 23). Si bien estos valores se encuentran dentro del rango esperado de operación, la distribución térmica resultó irregular a lo largo de la superficie, lo que sugiere una posible degradación localizada del material del ducto

de escape, potencialmente asociada a fenómenos de corrosión térmica o a deterioro progresivo por exposición prolongada a altas temperaturas.

Figura 23

Chimenea, extremo de descarga.

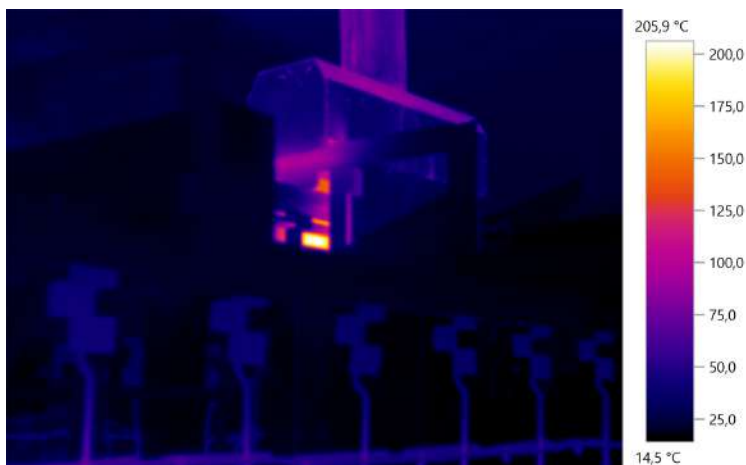


Nota. Puntos calientes localizados en la chimenea correspondiente al extremo de descarga del horno.

- **Subutilización de la chimenea del lado de carga:** En contraste, la chimenea situada en el extremo de carga mantiene temperaturas significativamente inferiores, en torno a los 70 °C, lo cual evidencia una condición de subutilización. Esta diferencia térmica sugiere un desequilibrio en el sistema de evacuación de gases de combustión, implicando que dicha chimenea no está cumpliendo eficientemente su función dentro del proceso térmico.

Figura 24

Chimenea, extremo de carga.



Nota. Subutilización de la chimenea en el extremo de carga durante el proceso de alivio de tensiones.

- **Fallas en el aislamiento térmico:** Se registraron también zonas calientes en el piso del horno (Figura 25), particularmente en el extremo de descarga, marcando 258 °C en el punto más caliente. Mientras que, bajo la cámara de combustión (Figura 26), se encontraron elementos estructurales y puntos calientes anómalos, muy cercanos a la tubería de combustible y a los cables eléctricos.

Figura 25

Piso del horno, extremo de descarga

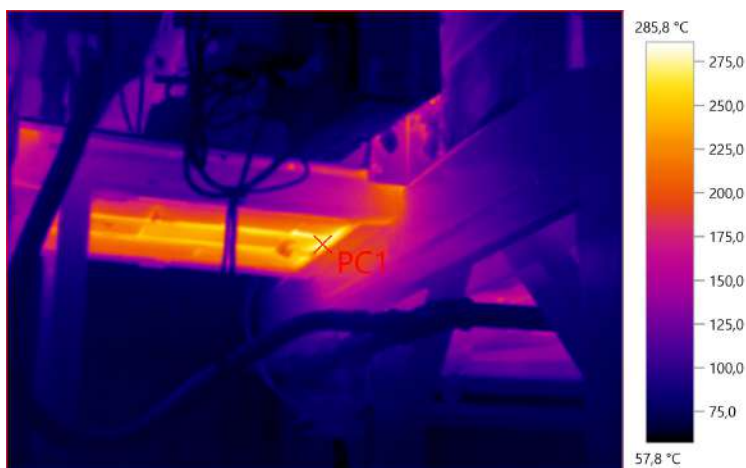
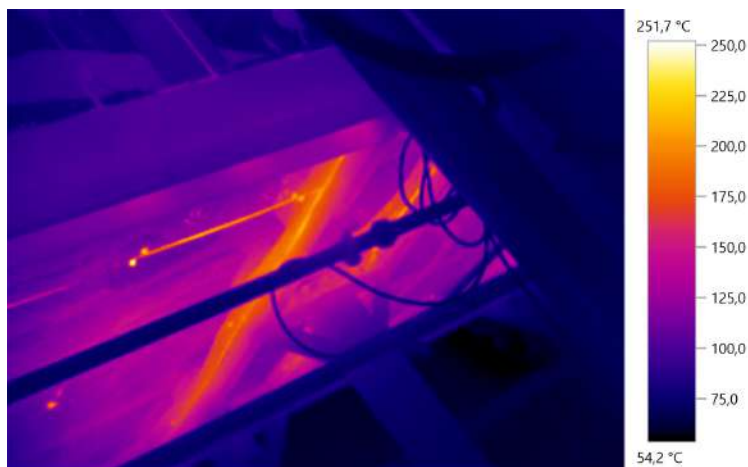


Figura 26

Piso del horno, bajo la cámara de combustión.



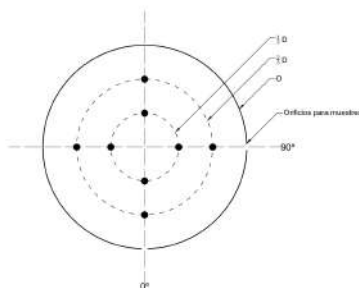
La información obtenida del análisis termográfico será utilizada para mapear las áreas prioritarias de intervención y dimensionar el alcance de las reparaciones requeridas en el proyecto de mejora.

4.2.4. Análisis de gases de combustión

Para evaluar el estado del proceso de combustión, se realizó un análisis de los gases presentes en el ducto de escape del horno. El procedimiento consistió en efectuar ocho mediciones distribuidas en dos ejes ortogonales (0° y 90°), a cuatro profundidades desde el borde hacia el centro de la chimenea (37.5 mm, 11.25 mm, 18.75 mm y 26.00 mm), conforme se ilustra en la Figura 27. Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un analizador multigás portátil marca BACHARACH PCA 400 (Figura 28), calibrado el 11 de noviembre de 2024, bajo condiciones de operación estable. A partir de los datos obtenidos, se calcularon valores promedio y se aplicó la corrección correspondiente a 0% de O_2 , con el fin de permitir una comparación adecuada con los criterios normativos vigentes.

Figura 27

Puntos de muestreo dentro de la sección transversal de la chimenea.

**Figura 28**

Equipo de medición de gases BACHARACH PCA 400.



Las mediciones obtenidas se presentan en la Tabla 22, donde se detallan los valores registrados en cada uno de los puntos de muestreo. Estos resultados constituyen la base para el diagnóstico del proceso de combustión.

- **Exceso de aire:** La concentración de oxígeno residual (O_2) medida en los gases de escape fue de 13.5%, lo que implica un exceso de aire (EA) del 169.6%. Este valor se encuentra muy por encima del margen recomendado para la combustión de gas licuado

de petróleo (GLP), el cual oscila entre 10 % y 30 % sobre el aire estequiométrico. Un exceso de aire tan elevado disminuye la temperatura de llama, incrementa las pérdidas térmicas por los gases de escape y diluye la energía disponible para el proceso, reduciendo sustancialmente la eficiencia térmica del horno (Mullinger y Jenkins, 2014).

- **Baja concentración de CO₂:** La concentración de dióxido de carbono (CO₂) fue de apenas 4.9 %, un valor significativamente bajo frente al 10-12 % esperado en condiciones de combustión completa. Este resultado es coherente con el alto contenido de oxígeno y sugiere una mezcla aire-combustible pobre o una combustión mal distribuida.
- **Presencia de productos de combustión incompleta:** Se registraron concentraciones de monóxido de carbono (CO) de 1,092 ppm, con un valor corregido a oxígeno nulo (CO(0)) de 2,739 ppm. Estos valores superan ampliamente los umbrales aceptables para procesos industriales seguros, <500 ppm CO(0), y constituyen una evidencia directa de combustión incompleta, posiblemente atribuible a una distribución inadecuada del aire primario o a la liberación de compuestos orgánicos volátiles provenientes de la pintura electrostática que no se oxidan completamente en el tiempo de residencia disponible.
- **Formación de contaminantes nocivos:** Se identificaron emisiones de óxidos de nitrógeno (NO_x) y dióxido de azufre (SO₂) con valores medios de 18.06 ppm y 23.38 ppm, respectivamente. Estos compuestos resultan de la combustión a alta temperatura de materiales con contenido de nitrógeno (N) y azufre (S), como algunos pigmentos, plastificantes o aditivos de las pinturas. Ambos compuestos son altamente corrosivos y se asocian con fenómenos de nitruración, sulfuración y corrosión acelerada por sales fundidas según Sánchez Pastén (2016), tal como han sido evidenciados en los daños estructurales documentados durante la inspección del horno.
- **Eficiencia térmica del sistema fuera de rango:** El valor reportado de eficiencia térmica (EFF) fue de 60.7 %, valor cuestionable para hornos abiertos sin sistemas de recuperación. Este valor puede explicarse por el alto exceso de aire, las pérdidas de calor por radiación y conducción a través de la carcasa y la emisión de gases calientes sin aprovechamiento energético.
- **Temperatura de los gases de escape:** La temperatura media registrada en la sonda fue de 377.13 °C, valor que indica una pérdida térmica significativa a través de los gases de

combustión y que podría ser mitigada mediante un rediseño del sistema de extracción, incorporación de una cámara secundaria de postcombustión o recuperación de calor.

- **Caudal volumétrico de gases:** Se registró un caudal de gases de 1.03×10^{-5} [m³/s], (flow) el cual parece subestimado, considerando la carga térmica del horno y el volumen de gases generado por los quemadores. Aunque se podría realizar una medición más precisa del flujo másico total utilizando técnicas de anemometría o cálculo por balance de masa, evidencia la necesidad de evaluar correctamente el tiro de la chimenea y las necesidades de extracción.

4.2.5. Evaluación Numérica mediante CFD

La simulación por elementos finitos mediante ANSYS Fluent se plantea como herramienta complementaria al estudio del horno, permitiendo analizar en detalle los fenómenos de transferencia de calor, dinámica de fluidos y distribución de temperatura en su interior. A través de este enfoque computacional es posible identificar ineficiencias en el diseño y operación, tales como pérdidas térmicas, zonas con gradientes de temperatura no uniformes o patrones de flujo que afectan la homogeneidad del tratamiento térmico. Para ello, se definen rigurosamente las siguientes condiciones de borde:

Caudal másico de ingreso: El ingreso de combustible y aire se modela mediante una condición de tipo *Mass Flow Inlet*, denominadas en el modelo como «quemadores». El flujo másico de los gases de combustión se fija en

$$\dot{m}_{GLP} = 0.1140 \text{ kg/s},$$

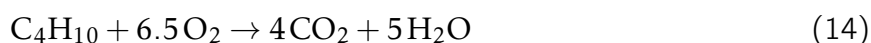
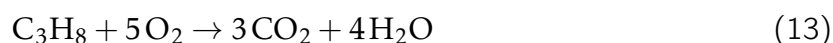
correspondiente a un consumo promedio de combustible de 2.415 Nm³/h y combustión estequiométrica. El cálculo se desarrolla en 4.3.2. La temperatura para este fluido de gases se fija a la temperatura de operación:

$$T_{in} = 700 \text{ C}$$

Densidad de los gases de combustión del GLP a 700 °C Se analiza la densidad de los gases de combustión generados por la combustión estequiométrica de gas licuado de petróleo

(GLP), compuesto por 75 % en fracción molar de propano (C_3H_8) y 25 % de butano (C_4H_{10}), asumiendo aire seco como comburente y comportamiento de gas ideal.

Reacciones estequiométricas Las reacciones químicas balanceadas para cada componente del combustible son:



Cálculo de productos de combustión Tomando como base 1 mol de GLP:

■ Propano: 0.75 mol

■ Butano: 0.25 mol

Los moles de productos generados son:

$$n_{CO_2} = 0.75(3) + 0.25(4) = 3.25 \quad (15)$$

$$n_{H_2O} = 0.75(4) + 0.25(5) = 4.25 \quad (16)$$

El oxígeno requerido es:

$$n_{O_2} = 0.75(5) + 0.25(6.5) = 5.375 \quad (17)$$

Considerando aire seco con una relación molar $N_2/O_2 = 3.76$, el nitrógeno asociado es:

$$n_{N_2} = 5.375 \times 3.76 = 20.19 \quad (18)$$

El número total de moles de gases de combustión es:

$$n_{total} = 3.25 + 4.25 + 20.19 = 27.69 \quad (19)$$

Composición molar de los gases de combustión

Especie	Moles	Fracción molar
CO ₂	3.25	0.117
H ₂ O (vapor)	4.25	0.153
N ₂	20.19	0.730

Peso molecular promedio El peso molecular promedio de la mezcla gaseosa se calcula como:

$$\bar{M} = \sum y_i M_i \quad (20)$$

$$\bar{M} = (0.117)(44.01) + (0.153)(18.02) + (0.730)(28.01) \quad (21)$$

$$\approx 28.35 \text{ kg/kmol} \quad (22)$$

Cálculo de la densidad a 700 °C Suponiendo comportamiento de gas ideal, la densidad se determina mediante:

$$\rho = \frac{P\bar{M}}{RT} \quad (23)$$

donde:

- $P = 101325 \text{ Pa}$
- $R = 8314 \text{ J/(kmol} \cdot \text{K)}$
- $T = 700 \text{ °C} = 973 \text{ K}$

Sustituyendo:

$$\rho_{973} = \frac{101325 \times 28.35}{8314 \times 973} \approx 0.36 \text{ kg/m}^3 \quad (24)$$

Resultado

$$\rho_{\text{gases de combustión}}(700\text{ }^{\circ}\text{C}) \approx 0.36\text{ kg/m}^3 \quad (25)$$

Este valor es representativo de gases de combustión calientes en hornos industriales y resulta adecuado para su uso en simulaciones CFD, siempre que se emplee un modelo de gas ideal con ecuación de energía activada, permitiendo capturar correctamente los efectos de flotabilidad y convección natural.

Salidas a presión cero: Las salidas de gases de combustión se modelan mediante una condición de borde tipo *Pressure Outlet*, con presión manométrica nula:

$$p_{\text{out}} = 0\text{ Pa},$$

lo que representa la descarga hacia la atmósfera. En el modelo estas superficies están denominadas como «chimenea», «entrada», «salida» y «aberturas».

Modelo de turbulencia: El régimen de flujo dentro del horno se considera turbulento. Se adopta el modelo de turbulencia *k-omega (2eqn)*ε realizable, por su robustez y buen desempeño en flujos con recirculaciones, chorros y combustión, típicos de hornos industriales. Este modelo permite una adecuada predicción del campo de velocidades y de la mezcla aire y combustible.

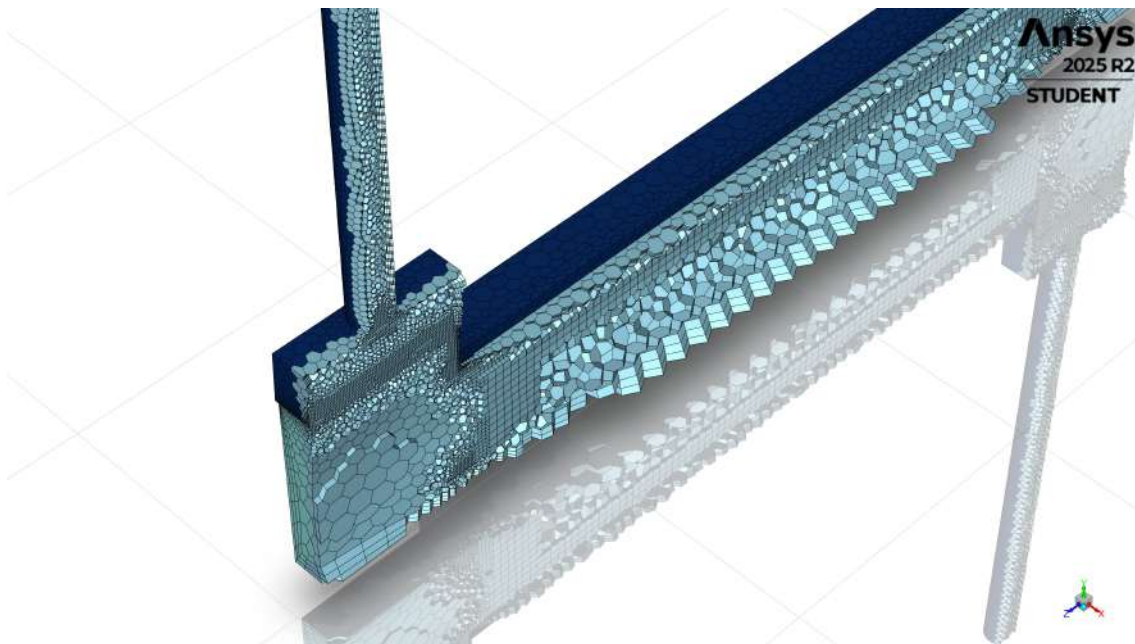
Calidad del mallado: El dominio computacional se discretiza mediante Fluent Meshing, usando elementos del tipo Poly-Hexcore como se aprecia en la Figura 29, con refinamiento local en las zonas de ingreso y tres capas adicionales en los límites de las paredes. Se asegura una calidad de malla adecuada cumpliendo los siguientes criterios:

- Diagnostics Scope : 1 Objects, 6 Face Zones, 1 Cell Zones
- Volume Diagnostics :
- Total Number of Faces = 18709
- Total Number of Interior Faces = 689008
- Total Number of Cells = 135782
- Minimum Orthogonal Quality = 0.2004

- Maximum Aspect Ratio = 37.95
- Number of Stair-Step Locations = 12
- Number of Isolated Cells = 0

Figura 29

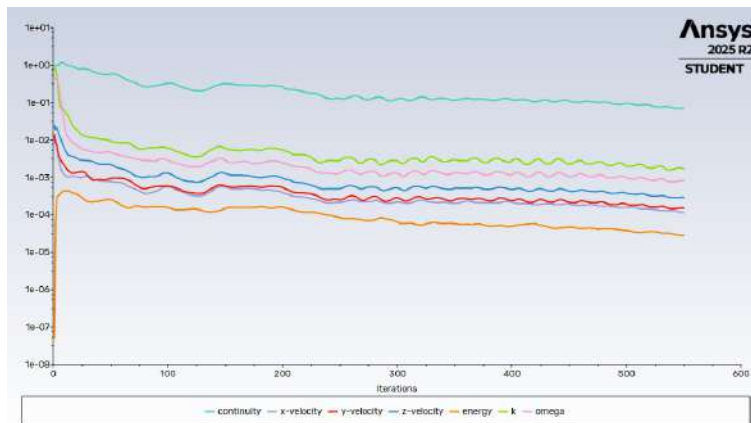
Mallado del modelo tridimensional del horno en su estado inicial.



Convergencia: El criterio de convergencia se considera alcanzado cuando los residuos normalizados de las ecuaciones de continuidad, cantidad de movimiento, energía y turbulencia, tras presentar oscilaciones transitorias propias del proceso iterativo, descienden y se estabilizan dentro de rangos aceptables, manteniendo una tendencia asintótica hacia valores constantes.

Figura 30

Convergencia de resultado después de 550 iteraciones

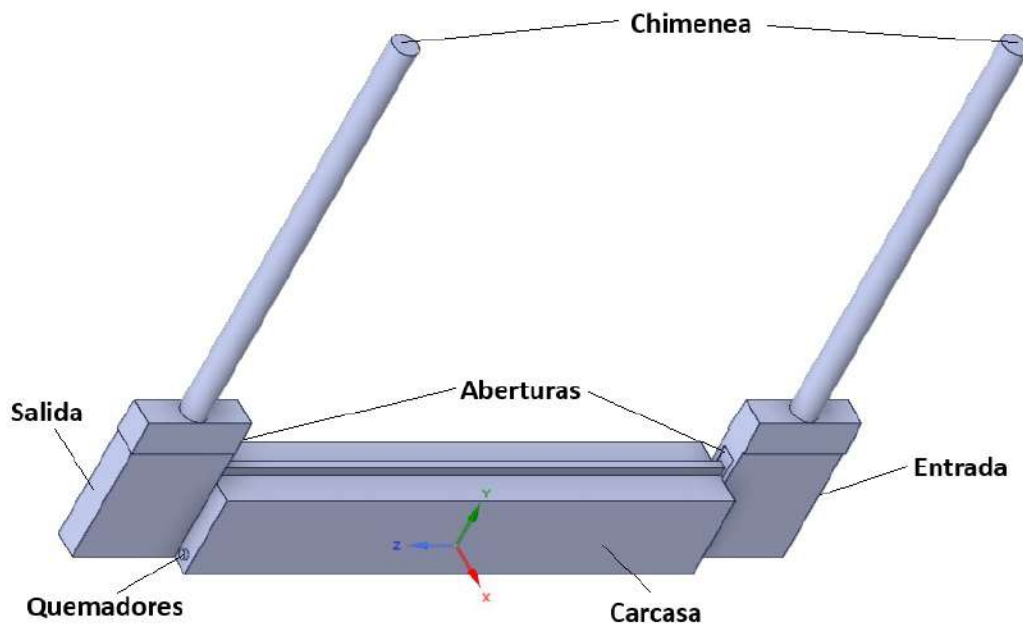


Paredes a condición térmica: Las paredes del horno se modelan como superficies sólidas adiabáticas. Las propiedades térmicas del revestimiento de fibra cerámica se definen con una conductividad térmica dependiente de la temperatura y un calor específico promedio de $C_p = 1130 [J/(kg \cdot K)]$ y espesor de 20 cm.

En cuanto a la geometría, se construye una representación 3D del volumen interior del horno, físicamente representativa que sirva de frontera para la simulación como se muestra en la Figura 31

Figura 31

HAT - Modelo tridimensional de la cámara de combustión.



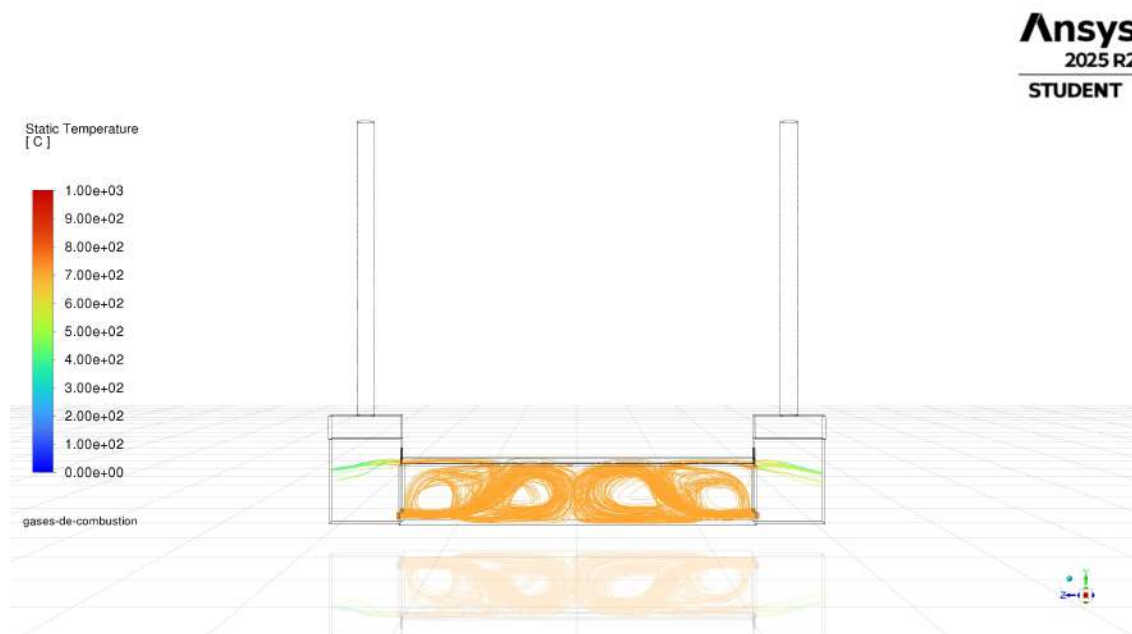
Nota. Vista isométrica del HAT con las designación de las superficies para la simulación: Carcasa: Wall, Chimenea: Pressure outlet, Quemadores: Mass flow inlet, Aberturas: Pressure outlet, Entrada y Salida: Pressure outlet.

El resultado fue el siguiente:

- **Flujos turbulentos y laminares:** La Figura 32 evidencia un régimen de flujo predominantemente turbulento en la cámara de combustión, caracterizado por la formación de dos vórtices principales en su interior. En contraste, en las zonas de precalentamiento, enfriamiento y evacuación se observa un comportamiento más laminar, acorde con la reducción de velocidad y la geometría del conducto.

Figura 32

HAT - Flujo interno de gases de combustión.

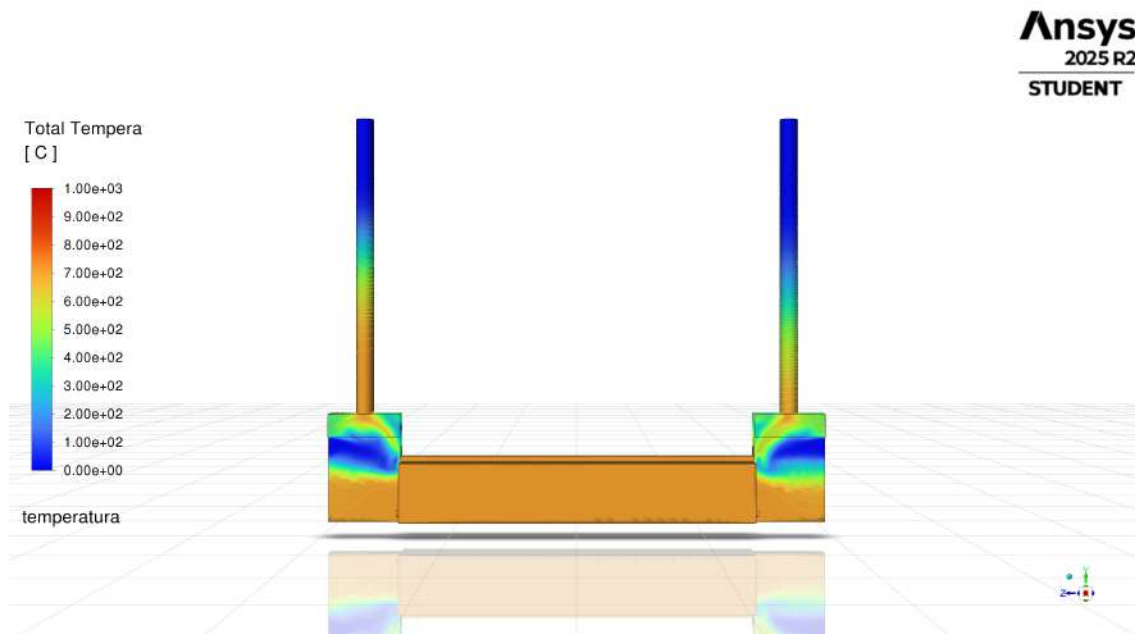


Nota. Vista lateral del HAT y el comportamiento del flujo interno de gases de combustión bajo condiciones estacionarias, utilizando un modelo tridimensional con turbulencia k - ω SST, 200 pasos y sin reacción química.

- **Distribución de calor irregular:** La Figura 33 presenta la distribución de temperatura en la cámara interna del horno bajo condiciones estacionarias. El análisis revela la presencia de zonas de menor temperatura en las campanas y en la boca de las chimeneas, indicando una distribución térmica no uniforme en dichas regiones.

Figura 33

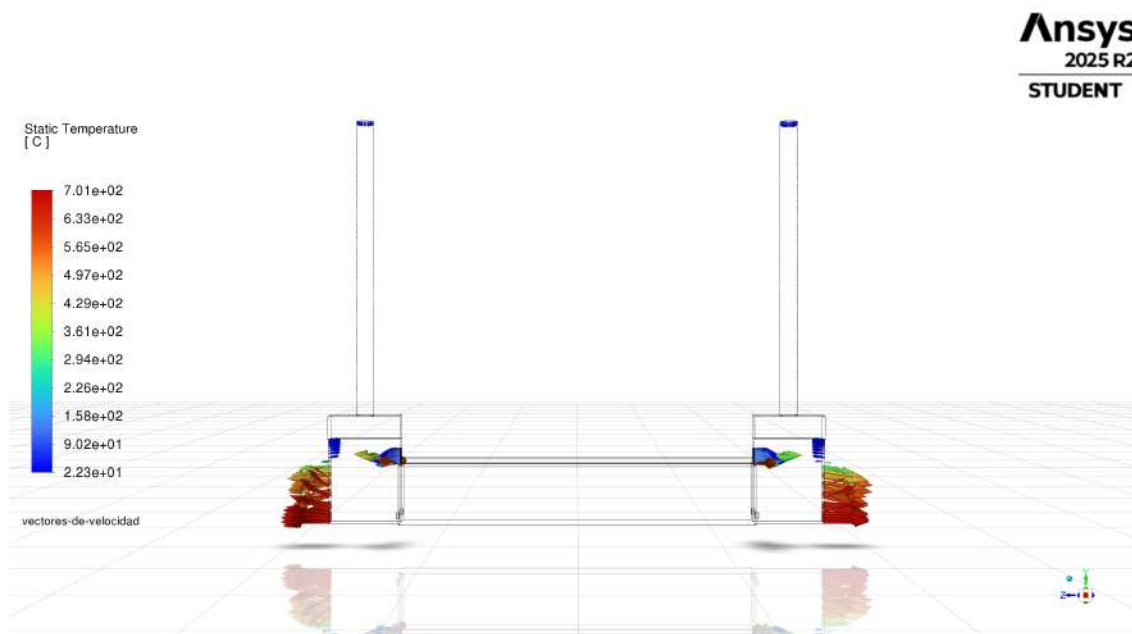
HAT - Distribución de temperatura en la cámara de combustión.



- **Pérdidas por flujo no controlado de aire y gases:** La Figura 34 presenta la vista lateral del HAT y los vectores de velocidad de los gases de combustión a través de las aperturas del horno en la cámara interna, bajo condiciones estacionarias. Se observa una mínima, casi nula, evacuación de gases a través de las chimeneas, en contraste con una salida predominante por las aperturas de carga y descarga. Asimismo, se identifica la infiltración de aire frío desde la zona inferior de las campanas de las chimeneas.

Figura 34

HAT - Vectores de velocidad de los gases de combustión.



4.2.6. Diagnóstico

El análisis integral del horno de alivio de tensiones de la empresa TECNERO evidencia que su deterioro no obedece únicamente al paso del tiempo, sino que es el resultado acumulativo de deficiencias en su diseño estructural, selección de materiales, condiciones de operación y mantenimiento. La inspección visual, complementada con termografía infrarroja, permitió identificar daños significativos en la carcasa metálica, el sistema de soporte y el revestimiento refractario, así como la presencia de mecanismos de corrosión avanzados que comprometen la integridad del equipo. Entre los principales hallazgos destacan:

1. Fracturas en cordones de soldadura y deformaciones plásticas permanentes en elementos estructurales, originadas por ciclos térmicos y gradientes de temperatura elevada.
2. Corrosión por halógenos, sulfuración y hot corrosion, atribuidas a contaminantes presentes en el GLP y residuos de pintura, cuyas manifestaciones incluyen escamas metálicas, depósitos pulverulentos y decoloraciones superficiales.
3. Fallas de aislamiento, que se traducen en pérdidas térmicas superiores a las aceptables,

con temperaturas superficiales de hasta 560 °C en zonas externas, cuando la literatura especializada recomienda valores menores a 80 °C para un aislamiento eficiente (Mullinger y Jenkins, 2014).

4. Presencia de llama amarilla durante el proceso de quemado de pintura, confirmada por inspección visual y análisis de gases, lo cual indica combustión incompleta. Este fenómeno fue cuantificado mediante mediciones que revelaron concentraciones elevadas de monóxido de carbono (CO) —1,092 ppm promedio y 2,739 ppm corregido a oxígeno nulo—, junto con un exceso de aire del 169.6% y un bajo contenido de dióxido de carbono CO₂ del 4.9%.
5. Pérdidas por flujo no controlado de aire y gases, caracterizadas por una evacuación mínima de gases a través de las chimeneas y una salida predominante por las aperturas de carga y descarga.

Estos hallazgos son coherentes con las observaciones visuales reportadas. Además de un ambiente laboral con alta concentración de partículas suspendidas, perceptibles a simple vista en el recinto. Esta condición ha obligado a implementar el uso obligatorio de respiradores para los operadores, con el fin de reducir la exposición a residuos particulados y compuestos volátiles liberados durante la quema de pintura.

En consecuencia, se determina que tanto la eficiencia térmica como la vida útil del horno se encuentran severamente comprometidas. Las elevadas pérdidas de calor, la falta de estanqueidad térmica, la presencia de combustión incompleta, el marcado exceso de aire y la emisión de compuestos contaminantes no solo aceleran los mecanismos de corrosión interna del sistema, sino que también comprometen la salud ocupacional en términos de seguridad e higiene industrial.

Se concluye que la mejora del rendimiento térmico y operativo del horno requiere una intervención integral orientada a la optimización de la relación aire-combustible, la implementación de sistemas de control automático de combustión y el diseño del sistema de evacuación de gases, con el objetivo de minimizar las pérdidas energéticas y reducir la generación de contaminantes. Asimismo, se recomienda la sustitución de los materiales estructurales actuales por aleaciones y componentes con mayor resistencia a ciclos térmicos y agresiones químicas, especialmente frente a compuestos derivados del GLP y residuos de pintura.

De igual manera, resulta fundamental garantizar una distribución térmica homogénea a lo

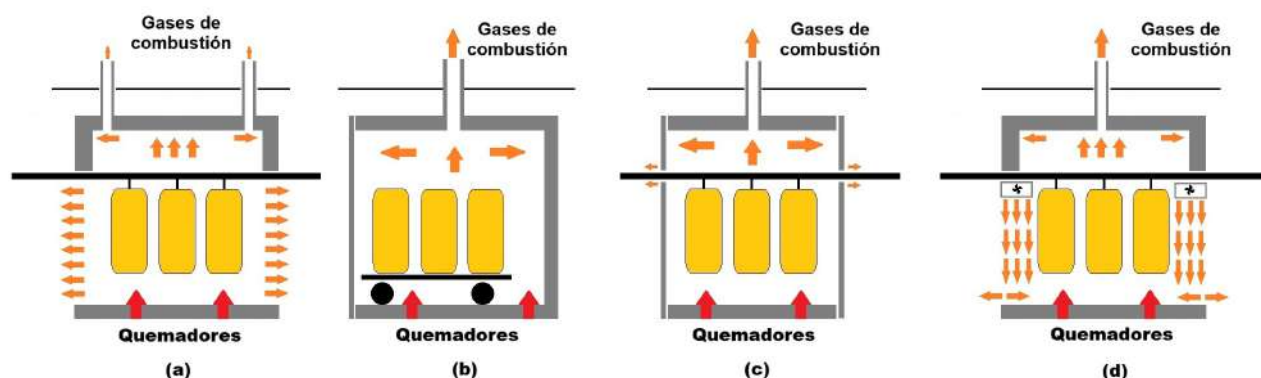
largo de las zonas de precalentamiento, combustión y enfriamiento, de modo que se establezcan condiciones de operación estables, eficientes y sostenibles a largo plazo, tanto desde el punto de vista energético como estructural. Esta estrategia permitirá no solo incrementar la eficiencia global del sistema, sino también prolongar la vida útil del equipo y mitigar los riesgos asociados a la degradación de materiales y a la exposición del personal operativo a entornos contaminantes.

4.3. Fase 2 - Diseño

Tras el diagnóstico integral del horno en su estado actual (Figura 35.a), se desarrollaron tres alternativas para el HAT, en las cuales se priorizan tres criterios fundamentales: eficiencia energética, precisión en el control del proceso térmico y adecuado manejo de emisiones. Si bien cada propuesta otorga un énfasis particular a uno de estos aspectos, ninguno de ellos ha sido desestimado ni omitido, dado que todos resultan esenciales para garantizar tanto la correcta operación del sistema, la seguridad de los operarios y el cumplimiento de los estándares de calidad de los cilindros tratados.

Figura 35

Esquema representativo del HAT en su estado actual y la propuesta de mejora.



1. Horno de operación cerrada por lotes, (Figura 35.b)

- *Modo de operación:* Monocámara, con carga y descarga por lotes mediante coches transportadores y alimentación manual.
- *Control térmico:* Calentamiento, alivio de tensiones y enfriamiento completamente controlados en un ambiente aislado del exterior.
- *Control de emisiones:* Evacuación de gases gestionada y conducida hacia el exterior.
- *Notas de desempeño:* Geometría que optimiza la distribución de calor; menor tamaño y pérdidas térmicas reducidas.

2. Horno de operación semicontinua por lotes con cadena transportadora, (Figura 35.c)

- *Modo de operación:* Monocámara con alimentación por lotes mediante cadena transportadora.
- *Contención:* Compuertas en ingreso y salida para limitar la fuga de gases.
- *Control térmico:* Régimen térmico controlado durante todo el ciclo.
- *Control de emisiones:* Extracción localizada y sellos; eficiencia energética inferior a la alternativa 1.

3. Horno de operación continua con cortinas de aire y recirculación, (Figura 35.d)

- *Modo de operación:* Multicámara con alimentación continua mediante cadena transportadora.
- *Contención aerodinámica:* Cortinas de aire por recirculación para evitar fugas hacia la planta.
- *Control térmico:* Perfil térmico continuo y estable.
- *Control de emisiones:* Reducción de fugas mediante recirculación de aire caliente.

4.3.1. Dimensionamiento del horno

La Tabla 5 muestra la capacidad objetivo de producción del horno y las condiciones del proceso térmico definidas de acuerdo con los requerimientos operativos establecidos por TECNERO. A partir de estos parámetros se determinan las dimensiones geométricas del sistema, la sección transversal y la masa del revestimiento refractario. Con esta base, se desarrolla el análisis numérico correspondiente al cálculo de las necesidades térmicas, las pérdidas de calor, el consumo de GLP y el dimensionamiento del tiro de la chimenea, entre otros aspectos energéticos vinculados al diseño del horno.

El procedimiento de dimensionamiento se fundamenta en el modelo y las ecuaciones propuestas por Auces y Rodríguez (2003) para el cálculo de la demanda energética en hornos de alivio de tensiones, complementadas con las propiedades térmicas de los módulos de fibra cerámica proporcionadas por CCEWOOL (fabricante) (2024).

- **Longitud efectiva del HAT:** se determina a partir de la ecuación (26), la cual describe un movimiento rectilíneo uniforme, según Serway y Jewett (2014).

$$L = \frac{v_p}{t_p} \quad (26)$$

Tabla 5

Parámetros operativos de diseño del horno HAT proporcionados por TECNERO.

Parámetro	Símbolo	Valor [Unidad]
Masa del cilindro	m	14.22 [kg]
Capacidad de producción	CÁP	75 [u/h]
Temperatura ambiente	T_a	25 [°C]
Temperatura de proceso	T_p	700 [°C]
Temperatura del horno al tacto	T_s	< 100 [°C]
Temperatura de gases de combustión en chimenea	T_g	350°C
Tiempo de proceso	t_p	18 [min]
Velocidad de proceso	v_p	0.00833 [m/s]
Paso del cilindro	λ	0.4 [m]
Eficiencia	η	30 %
Composición del combustible	GLP	75 % propano, 25 % butano

Donde:

L Longitud efectiva del HAT, en metros [m].

v_p Velocidad del proceso, en metros por segundo [m/s].

t_p Tiempo del proceso, en segundos [s].

- **Tasa de producción:** Puede expresarse en términos de kilogramos por segundo mediante la ecuación (27):

$$\dot{m} = \frac{v_p m}{\lambda} \quad (27)$$

Donde:

$\dot{m}$ Tasa de producción [kg/s].

m Masa del cilindro [kg].

v_p Velocidad del proceso [m/s].

λ Paso del cilindro [m].

La Tabla 24 presenta los resultados del dimensionamiento obtenidos a partir de las ecuaciones (26) y (27).

4.3.2. Combustión estequiométrica

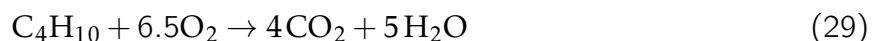
La relación estequiométrica necesaria para que la reacción química de combustión ocurra de forma completa, sin que sobren ni oxígeno ni combustible, de modo que todo el carbono se convierta en CO_2 y todo el hidrógeno en H_2O se determina de la siguiente manera:

Combustión del propano, ecuación balanceada:



1 mol de C_3H_{10} requiere 5 moles de O_2

Combustión butano, ecuación balanceada:



1 mol de C_4H_{10} requiere 6.5 moles de O_2

Composición del aire: 21% de O_2 + 79% de N_2

1 mol de O_2 está contenido en: $100/21 = 4.76$ moles de aire

1. Mezcla de combustión:

Cantidad de aire para obtener 5.0 moles de $\text{O}_2 = 5 \cdot 4.76 = 23.80$ moles de aire

Cantidad de aire para obtener 6.5 moles de $\text{O}_2 = 6 \cdot 4.76 = 30.94$ moles de aire

Cantidad de aire para 1 mol de GLP = $(0.75 \cdot 23.8) + (0.25 \cdot 30.94) = 25.59$ moles de aire.

Masa molar del propano: 44.1 g/mol

Masa molar del butano: 58.1 g/mol

Masa molar del GLP = $0.75 \cdot 44.1 + 0.25 \cdot 58.1 = 47.6 \text{ g/mol}$

Masa molar del aire: 28.97 g/mol

Masa de aire = $25.59 \cdot 28.97 = 740.5 \text{ g}$

Relación aire-combustible estequiométrica (Air/Fuel) = $740.5/47.6 = 15.55 \text{ kg/kg}$

2. **Flujo másico de los quemadores:** Para representar los quemadores dentro del horno, determinamos el flujo másico de la mezcla.

Flujo promedio de combustible: $2.415 \text{ Nm}^3/\text{h}$

Densidad propano: 1.83 kg/m^3 , ENGAS (2021b)

Densidad butano: 2.5 kg/m^3 , ENGAS (2021a)

Densidad GLP (75% propano + 25% butano): 1.9975 kg/m^3

Densidad aire 1.293 kg/m^3 , NASA Earthdata (2025)

Caudal másico de GLP 4.82 kg/h

Consumo aire estequiométrico 15.55 kg/kg

Caudal másico de la mezcla (Mass flow rate) 79.83 kg/h

Caudal másico de la mezcla (Mass flow rate) $0.02217422412 \text{ kg/s}$

3. **Temperatura adiabática:** Según Turns (2013), la temperatura adiabática de llama representa la temperatura máxima teórica que puede alcanzarse durante un proceso de combustión completa, bajo condiciones ideales, es decir, sin pérdidas de calor al entorno y con una mezcla perfectamente estequiométrica. En el caso de la combustión con aire como agente comburente, esta temperatura se sitúa en un rango de $1,975^\circ\text{C}$ a $2,020^\circ\text{C}$.

Esta estimación supone un suministro exacto de aire requerido para la combustión completa, con una relación másica aire-combustible del orden de 15.5:1. No obstante, en las condiciones de operación presentes, dicha temperatura se establece en 1000°C debido a pérdidas térmicas y exceso de aire.

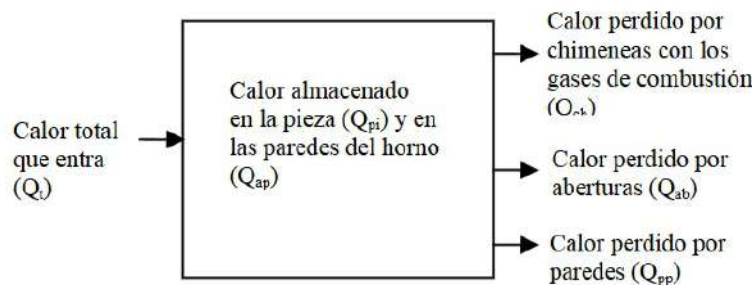
4.3.3. Balance energético

El cálculo de la demanda de calor se establece a partir de un balance de materia y energía, considerando que la energía aportada por los gases de combustión es igual a la suma de la

energía absorbida por el producto y las paredes del horno, más las pérdidas por conducción, radiación y evacuación de gases a través de la chimenea o aberturas. Este principio se ilustra en la Figura 36 tomada de Auces y Rodríguez (2003).

Figura 36

Balance de calor en un horno de relevo de esfuerzos según Auces y Rodríguez (2003)



Nota. El balance de energía establece que el calor suministrado al horno equivale a la suma del calor que se transfiere hacia el exterior y el que se almacena en el sistema.

- **Potencia requerida:** para el balance energético se expresa mediante la ecuación (30) adaptada de Mullinger y Jenkins (2014):

$$\dot{Q}_t = \frac{\dot{Q}_{pi}}{\eta} \quad \text{o, alternatively,} \quad \dot{Q}_t = \frac{\dot{Q}_{pi} + \dot{Q}_{ab} + \dot{Q}_{pp} + \dot{Q}_{ch}}{\eta} \quad (30)$$

Donde:

$\dot{Q}_t$	Potencia total del horno [W]
$\dot{Q}_{pi}$	Potencia aprovechada por la carga [W]
$\dot{Q}_{pp}$	Potencia disipada por el horno [W]
$\dot{Q}_{ab}$	Potencia emitida por radiación a través de las aberturas [W]
$\dot{Q}_{ch}$	Potencia perdida por los gases de combustión [W]
η	Eficiencia del sistema [adimensional]

- **Potencia requerida para la carga:** se determina mediante la integración del calor específico en cada intervalo de temperatura, de acuerdo con la ecuación (31), adaptada de Auces y Rodríguez (2003).

$$\dot{Q}_{pi} = \dot{m} \cdot \sum_i (C_{p,i} \cdot \Delta T_i) \quad (31)$$

Donde:

$\dot{Q}_{pi}$ Potencia aprovechada [W].

$\dot{m}$ Tasa de producción [kg/s].

$C_{p,i}$ Calor específico del material, para el acero ASTM-A36 es 486 [J/kg·K] acorde a Industries (s.f.).

ΔT_i Incremento de temperatura en el intervalo i [K].

- **Pérdidas por convección natural:** Las pérdidas térmicas a través de la carcasa del horno se estiman mediante la ecuación (32), formulada por Auces y Rodríguez (2003) para cuantificar el calor transferido hacia el exterior a través de las paredes del equipo.

$$\dot{Q}_{pp} = \dot{k} S \Delta T \quad (32)$$

Donde:

$\dot{Q}_{pp}$ Potencia pérdida por convección [W].

$\dot{k}$ Tasa de transferencia de calor [W/(m·K)].

S Superficie externa de las paredes del horno [m²].

ΔT) diferencia de temperatura entre la pared exterior del horno y el ambiente [K].

La magnitud resultante $\dot{Q}_{pp}$ representa el flujo térmico perdido por conducción y convección a través de las paredes, expresado en [W]; en el trabajo de referencia puede también presentarse en [kJ/h] según la conversión utilizada. (Auces y Rodríguez, 2003).

- **Pérdidas por aberturas (radiación a través de aberturas):** Se producen cuando los gases calientes y las superficies internas del horno emiten radiación hacia el ambiente a través de las aberturas o rendijas presentes en la carcasa. Estas pérdidas pueden estimarse considerando el área efectiva de emisión y la intensidad radiativa, según las ecuaciones (33) y (34), adaptadas de Auces y Rodríguez (2003).

$$\dot{Q}_{ab} = \dot{Q}_r A_{ET} \quad (33)$$

$$\dot{Q}_r = \sigma \varepsilon (T_G^4 - T_a^4) \quad (34)$$

Donde:

$\dot{Q}_{ab}$	Potencia perdida por radiación a través de las aberturas [W].
$\dot{Q}_r$	Tasa de radiación emitida por unidad de área [W/m ²].
A_{ET}	Área efectiva de las aberturas o rendijas por donde se emite radiación [m ²].
σ	Constante de Stefan–Boltzmann (5.670×10^{-8} W/m ² ·K ⁴).
ε	Emisividad efectiva de la superficie/gas (adimensional, 0–1).
T_G	Temperatura media de la llama y superficies internas del horno [K].
T_a	Temperatura ambiente [K].

Estas ecuaciones se basan en la ley de Stefan–Boltzmann para radiación térmica de cuerpos grises, considerando que la superficie o gas emisor puede aproximarse como un cuerpo gris con emisividad efectiva ε . Las pérdidas de radiación son proporcionales a la cuarta potencia de la temperatura absoluta, lo que evidencia la importancia de mantener un control térmico adecuado en los hornos industriales. (Auces y Rodríguez, 2003).

- **Pérdidas por los gases de combustión:** Las pérdidas de energía asociadas a los gases de combustión (Q_{ch}) constituyen una de las principales fuentes de ineficiencia térmica en los hornos industriales. Para su estimación se emplea un procedimiento adaptado de Auces y Rodríguez (2003) y Mullinger y Jenkins (2014), el cual integra el cálculo del consumo de combustible, el flujo másico de los gases generados y la energía transportada por estos a la salida del sistema.

A diferencia de la metodología iterativa propuesta por Auces y Rodríguez (2003), en el presente trabajo se adopta el enfoque de Mullinger y Jenkins (2014), que considera una eficiencia térmica del horno η en el rango típico de 5% a 35%, dependiendo del tipo de horno y las condiciones operativas. A partir de la potencia total requerida ($\dot{Q}_t$) —determinada mediante la ecuación (30)— se obtiene el gasto de combustible (W)

considerando el poder calorífico promedio del gas licuado de petróleo (GLP), conforme a la ecuación (35):

$$\dot{W} = \frac{\dot{Q}_t}{PCI_{prom}} \quad (35)$$

Donde:

- $\dot{W}$ Consumo de combustible [kg/s].
 $\dot{Q}_t$ Potencia térmica total requerida [W].
 PCI_{prom} Poder calorífico promedio del GLP [kJ/kg].

El poder calorífico promedio del GLP depende de la proporción de sus componentes principales, propano y butano. Para una mezcla típica compuesta por una fracción de 75% de propano y 25% de butano, el valor de PCI_{GLP} se obtiene mediante la relación ponderada expresada en la ecuación (36):

$$PCI_{GLP} = 0.75 \cdot PCI_{C_3H_8} + 0.25 \cdot PCI_{C_4H_{10}} \quad (36)$$

Donde:

- PCI_{GLP} Poder calorífico promedio del gas LP.
 $PCI_{C_3H_8}$ Poder Calorífico Inferior del propano, ≈ 46.35 [MJ/kg] U.S.D.o.E. (s.f.).
 $PCI_{C_4H_{10}}$ Poder calorífico del butano, ≈ 45.66 [MJ/kg] U.S.D.o.E. (s.f.).

Una vez determinado el consumo de combustible para la potencia total $\dot{Q}_t$, Auces y Rodríguez (2003) calcula el flujo másico de gases mediante la ecuación (37):

$$\dot{m}_g = (1 + G') \cdot \dot{W} \quad (37)$$

Donde:

- $\dot{m}_g$ Flujo másico de los gases de combustión [kg/h].
 $\dot{W}$ Consumo de combustible [kg/s].
 G' Consumo de aire estequiométrico [kg/kg], ver sección 4.3.2.

Finalmente, las pérdidas térmicas por los gases de combustión se determinan mediante la ecuación (38), que relaciona el flujo másico de los gases con su capacidad calorífica y el diferencial de temperatura entre los gases y el ambiente:

$$\dot{Q}_{ch} = \dot{m}_g \cdot C_p \cdot (T_g - T_a) \quad (38)$$

Donde:

$\dot{Q}_{ch}$	Pérdidas de potencia por los gases de combustión [W].
$\dot{m}_g$	Flujo másico de los gases de combustión [kg/s].
C_p	Calor específico promedio de los gases de combustión [J/(kg·K)].
T_g	Temperatura promedio de los gases de combustión [K].
T_a	Temperatura ambiente [K].

La Tabla 25 presenta el cálculo del balance energético del sistema, elaborado a partir de las ecuaciones (31), (30), (32), (33), (36), (35), (37) y (38).

4.3.4. Flujo másico de la mezcla

El cálculo del flujo másico de la mezcla de combustible permite determinar la cantidad de gases que se requiere evacuar por unidad de tiempo para satisfacer la demanda térmica del horno.

- **Flujo másico de los gases de combustión:** El volumen específico de los gases, $\dot{m}_g$ [kg/s], se determina a partir de la ley de los gases ideales (42) acorde a (Sonntag, Borgnakke, y Van Wylen, 2013), para ello, es necesario determinar primeramente el volumen específico de la mezcla :

$$\nu_g = \frac{R_g T_g}{P_g} \quad (39)$$

$$R_g = \frac{R_u}{M_g} \quad (40)$$

Donde:

ν_g	Volumen específico, recíproco de la densidad [m^3/kg].
R_g	Constante del gas, 8.314 [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$].
R_u	Constante universal de los gases, 8.314 [$\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$].
M_g	Masa molar del gas [kg/mol].
T_g	Temperatura promedio de los gases [K].
P_g	Presión de los gases en la base de la chimenea [Pa].

- **Masa molar de los gases de combustión:** De acuerdo con Çengel y Boles (2019), la masa molar promedio de una mezcla gaseosa puede determinarse mediante un promedio ponderado en función de la fracción molar de cada componente, como lo muestra la ecuación (41):

$$M_{\text{mezcla}} = \sum_i y_i M_i \quad (41)$$

M_{mezcla} Masa molar de la mezcla [g/mol].

y_i flujo másico de gases [kg/s].

En nuestro caso, el gas licuado de petróleo (GLP) está compuesto por un 75% de propano (C_3H_8) y un 25% de butano (C_4H_{10}), en fracción molar o volumétrica. Las masas molares individuales son:

$$M_{\text{C}_3\text{H}_8} = 3(12.011) + 8(1.008) = 44.094 \text{ [g/mol]}$$

$$M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} = 4(12.011) + 10(1.008) = 58.122 \text{ [g/mol]}$$

Aplicando (41), La masa molar promedio del GLP se calcula como:

$$\begin{aligned} M_g &= (0.75) M_{\text{C}_3\text{H}_8} + (0.25) M_{\text{C}_4\text{H}_{10}} \\ &= (0.75)(44.094) + (0.25)(58.122) \\ &= 33.0705 + 14.5305 \\ &= 47.601 \text{ [g/mol]} = 0.0476 \text{ [kg/mol]} \end{aligned}$$

$M_g = 47.6 \text{ [g/mol]}$

- **Caudal volumétrico:** El caudal se calcula mediante la ecuación (42), utilizando una velocidad de gases de 12 m/s según la Tabla 6.

$$\dot{V}_g = \dot{m}_g \nu_g \quad (42)$$

Donde:

$\dot{V}_g$ caudal volumétrico de los gases [m^3/s].

$\dot{m}_g$ flujo másico de gases [kg/s].

ν_g velocidad de los gases [m/s].

4.3.5. Diseño de la chimenea

El dimensionamiento de la chimenea se desarrolla como respuesta directa a las condiciones identificadas en la Fase 1, particularmente las asociadas a la evacuación insuficiente de gases y a la presencia de flujos no controlados en las aperturas del horno. A partir de dicho diagnóstico, se establece la necesidad de evaluar rigurosamente la capacidad de tiro térmico, las pérdidas de carga y los parámetros geométricos que garanticen una extracción eficiente y estable de los gases de combustión. En esta sección se presentan los criterios de diseño, las ecuaciones empleadas y los resultados numéricos obtenidos para determinar la altura y diámetro adecuados de la chimenea.

Para el diseño de chimeneas industriales, la norma AENOR (2021) establece valores recomendados de velocidad, presión y temperatura, los cuales se resumen en la Tabla 6.

Notas:

- La *velocidad de salida* mínima de los gases debe ser superior a 10 m/s para evitar la recirculación y garantizar una dispersión adecuada de los humos.
- La *presión de tiro* debe ser suficiente para superar las pérdidas por fricción y otros obstáculos presentes en el sistema.
- La *temperatura de los gases* afecta directamente la densidad de los mismos y, por tanto, el tiro disponible.
- **Diámetro de la chimenea:** Con los valores de velocidad y caudal de gases estimados, el diámetro interno de la chimenea puede determinarse mediante la ecuación (43):

Tabla 6

Valores típicos para el diseño de chimeneas industriales según AENOR (2021).

Combustión	Velocidad v_g [m/s]	Presión de tiro ΔP_t [Pa]	Temperatura T_g [°C]
Gas natural	10–15	20–40	200–250
Carbón	12–18	30–60	300–350
Biomasa	8–12	25–50	250–300
Petróleo	10–15	20–40	200–250
Horno industrial	12–18	30–60	300–350

$$D = \sqrt{\frac{4 \dot{V}_g}{\pi v_g}} \quad (43)$$

Donde:

D Diámetro interno de la chimenea [m].

$\dot{V}_g$ Caudal volumétrico de gases de combustión [m³/s].

v_g Velocidad promedio de los gases en la chimenea [m/s].

- **Altura de la chimenea:** La altura de la chimenea (H) depende del tiro térmico, generado por la diferencia de densidades entre los gases calientes y el aire ambiente. La presión inducida por tiro natural se puede calcular mediante la ecuación (44), Sonntag, Borgnakke, y Wylen (2003):

$$\Delta P_t = g H (\rho_a - \rho_g) \quad (44)$$

Donde:

ΔP_t Diferencia de presión por tiro térmico [Pa].

g Aceleración de la gravedad, (9.81 m/s²).

H Altura efectiva de la chimenea [m].

ρ_a Densidad del aire ambiente [kg/m³].

ρ_g Densidad promedio de los gases de combustión [kg/m³].

La densidad del aire ambiente se obtiene mediante la ecuación de estado del gas ideal (39), considerando la presión atmosférica corregida por la altura y la temperatura media ambiental. La presión atmosférica a una altura z sobre el nivel del mar se determina usando la ecuación barométrica con gradiente térmico (45), (Çengel y Boles, 2019):

$$P(z) = P_0 \left(1 - \frac{\Gamma z}{T_0} \right)^{\frac{gM}{RT_0}} \quad (45)$$

Donde:

$P(z)$ Presión atmosférica a la altura z [Pa].

P_0 Presión al nivel del mar (101325 Pa).

Γ Gradiente térmico atmosférico estándar [K/m].

T_0 Temperatura a nivel del mar [K].

M Masa molar del aire [kg/mol].

R Constante universal de los gases (8.31447 J/mol·K).

A partir de (45), la densidad del aire ambiente se obtiene mediante:

$$\rho_a = \frac{P(z)}{R_s T_a} \quad (46)$$

Donde:

ρ_a Densidad del aire ambiente [kg/m³].

R_s Constante de gas específica del aire seco (287 J/kg·K).

T_a Temperatura ambiente [K].

Finalmente, la altura de la chimenea se ajusta para asegurar que el tiro térmico generado (ΔP_t) sea suficiente para superar las pérdidas de carga totales del sistema de extracción de gases. En la práctica, este valor se determina de forma iterativa, equilibrando el flujo másico de gases, las pérdidas por fricción y la eficiencia térmica del horno Moran, Shapiro, Boettner, y Bailey (2020); Sonntag y cols. (2003).

La Tabla 27 presenta el cálculo de la chimenea basado en las ecuaciones (39), (40), (42), (43) y (44).

4.3.6. Diseño de la cortina de aire

Se propone implementar una cortina de aire en la entrada de la carga con el objetivo de formar una barrera que cumpla dos funciones principales: primero, precalentar los cilindros a su ingreso, reduciendo así la energía necesaria para alcanzar la temperatura del proceso; y segundo, impedir la fuga de gases de combustión hacia el interior de la planta a través de las aperturas del horno.

Se define una boquilla de aire de 35×1 [cm] con una velocidad de salida de 20 [m/s], seleccionada a partir de criterios de diseño utilizados en sistemas de cortinas de aire, los cuales requieren velocidades elevadas para generar una barrera efectiva que limite la infiltración y el intercambio térmico. Este rango de velocidades coincide con los parámetros recomendados para capas de chorro plano y aplicaciones de separación de flujos, donde se emplean velocidades típicas entre 15 y 25 [m/s] para asegurar un chorro estable y coherente (Munson, Young, Okiishi, y Huebsch, 2013).

- **Caudal de aire:** El caudal de aire se determina mediante la ecuación (47), que relaciona el área de la boquilla con la velocidad del chorro, de acuerdo con los principios fundamentales de mecánica de fluidos descritos por Munson y cols. (2013).

$$V_{boquilla} = S_{boquilla} \cdot v_{aire} \quad (47)$$

Donde:

$V_{boquilla}$	Caudal de aire a través de la boquilla [m ³ /s].
$S_{boquilla}$	Sección de la boquilla [m ²]
v_{aire}	Velocidad del aire a través de la boquilla [m/s].

A este caudal se le aplica un factor de corrección de 1.25 para compensar las pérdidas por fricción en la tubería.

La Tabla 29 presenta el cálculo de la cortina de aire, elaborado a partir de las ecuaciones (47), (38), (30) y las relaciones complementarias asociadas.

4.3.7. Resumen de la propuesta de mejora

A partir del diagnóstico realizado en la fase de caracterización, se desarrolló una propuesta técnica orientada a mejorar la eficiencia térmica, la distribución de temperatura y la captación de gases de combustión en el horno de alivio de tensiones. Las acciones propuestas se enfocan en reducir las pérdidas energéticas por conducción, convección y radiación, optimizar el tiro térmico y mejorar la transferencia de calor a la carga optimizando la posición de los quemadores en la cámara de combustión.

- **Eliminación de aberturas innecesarias:** Se eliminaron las aberturas en la base de las chimeneas que no cumplían una función operativa directa, incluyendo ranuras y espacios no utilizados en la carcasa del horno y en las zonas de paso de la cadena transportadora. Esta intervención redujo significativamente la superficie de pérdida convectiva y radiativa, contribuyendo a aumentar la eficiencia térmica global.
- **Optimización geométrica de la campana de extracción:** Se rediseñó la geometría de la campana superior con el fin de cubrir de forma efectiva todas las aberturas generadas por el sistema transportador de cilindros. De esta manera, se concentró la extracción de gases calientes en un único conducto, al centro del horno, dado la subutilización de una de las chimeneas del horno inicial lo que permite un mejor control del tiro térmico.
- **Cortinas de aire en la entrada y salida:** Se diseñaron cortinas de aire en ambos extremos del horno para reducir la infiltración de aire frío y minimizar la salida de gases de combustión hacia el ambiente. Estas cortinas favorecen la dirección del flujo hacia la chimenea, estabilizan la temperatura interna y mejoran la seguridad operativa al evitar la dispersión de gases calientes en el entorno de trabajo. El ingreso de gases se logra inyectando el gas caliente captado de la campana del horno y expulsándolo por una boquilla de acero inoxidable en el borde superior de la entrada y salida del horno.
- **Incremento del tiro térmico en chimenea:** Se incrementó la altura efectiva de la chimenea para mejorar la presión de tiro y favorecer la evacuación de gases a través de un único conducto. Este ajuste optimiza el flujo convectivo ascendente, evitando zonas de recirculación y pérdidas no controladas por las aberturas.
- **Optimización de la ubicación de quemadores mediante simulación:** Se realizaron simulaciones iterativas de dinámica de fluidos computacional (CFD) para determinar la

posición y orientación óptima de los quemadores. El objetivo fue maximizar la transferencia de calor por convección y radiación hacia la carga, logrando una distribución térmica más uniforme en toda la cámara de calentamiento. La disposición final de los quemadores permitió reducir puntos fríos y mejorar la homogeneidad térmica en la zona de tratamiento.

- **Selección de materiales resistentes:** La estructura interna fue fabricada en acero inoxidable AISI 316/316L, material que ofrece buena resistencia a la oxidación y la corrosión a altas temperaturas, además de durabilidad frente a ambientes de combustión moderadamente agresivos. Para el revestimiento interno se seleccionaron módulos de fibra cerámica debido a su baja conductividad térmica, resistencia al choque térmico y facilidad de instalación. Esta combinación de materiales reduce la masa térmica efectiva del horno y mejora su eficiencia energética.
- **Síntesis del diseño:** La integración de estas intervenciones constituye un enfoque integral para optimizar el desempeño térmico del horno, priorizando estrategias pasivas de control de pérdidas y mejorando la efectividad del sistema de combustión. Se espera que esta propuesta permita alcanzar niveles superiores de eficiencia y un funcionamiento más estable y seguro en condiciones industriales reales.

4.4. Fase 3 - Validación y comparación numérica

4.4.1. Estudio CFD del comportamiento térmico y fluidodinámico

La validación de la propuesta de mejora se llevó a cabo mediante un análisis comparativo entre el estado operativo inicial y la configuración optimizada. Para ello, se emplearon modelos térmicos y de dinámica de fluidos computacional (CFD), con el fin de cuantificar la eficiencia energética alcanzada y caracterizar la distribución térmica dentro de la cámara de calentamiento.

El análisis numérico busca conocer la respuesta del sistema en cuanto a:

- Eficiencia térmica (%).
- Pérdidas por convección y radiación.
- Uniformidad térmica dentro de la cámara.
- Caudal de gases evacuado por la chimenea.

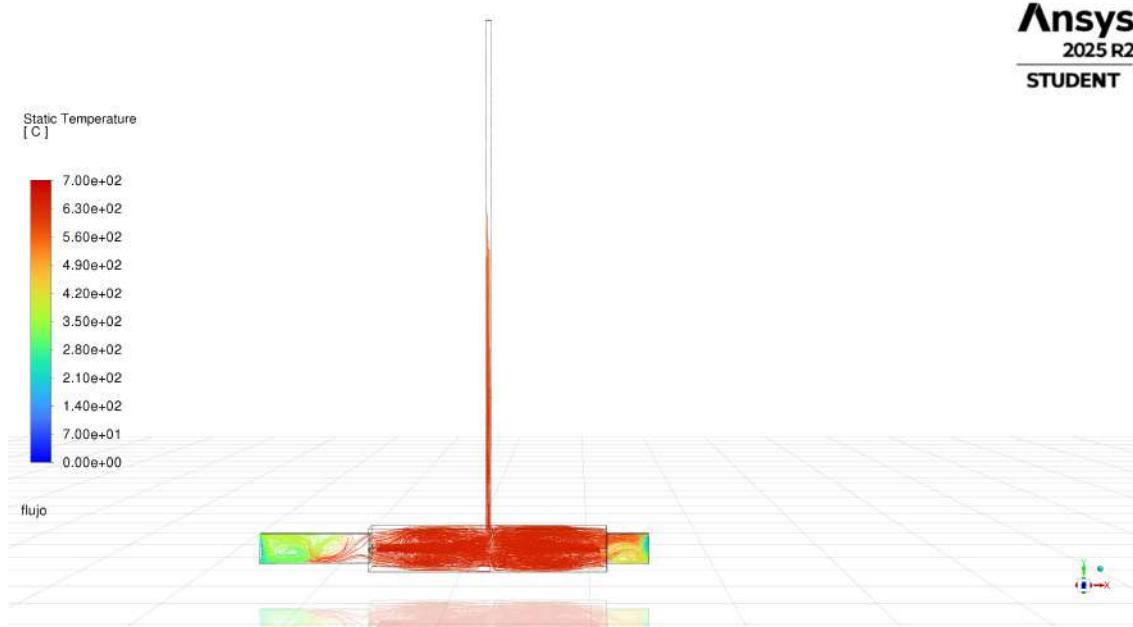
- Consumo de combustible.

El análisis arrojó los siguientes hallazgos:

- **Flujos turbulentos y laminares:** La Figura 37 evidencia un comportamiento térmico y fluidodinámico fuertemente influenciado por la geometría del horno y las cortinas de aire y la presión de tiro generada a lo largo de la chimenea. La distribución de temperaturas revela un núcleo térmico dominante en la cámara de combustión, que se mantiene relativamente confinados dentro del volumen primario del horno.

Figura 37

HAT - Flujo interno de gases de combustión.



Nota. Vista lateral del HAT y el comportamiento del flujo interno de gases de combustión bajo condiciones estacionarias, utilizando un modelo tridimensional con turbulencia k - ω SST y sin reacción química.

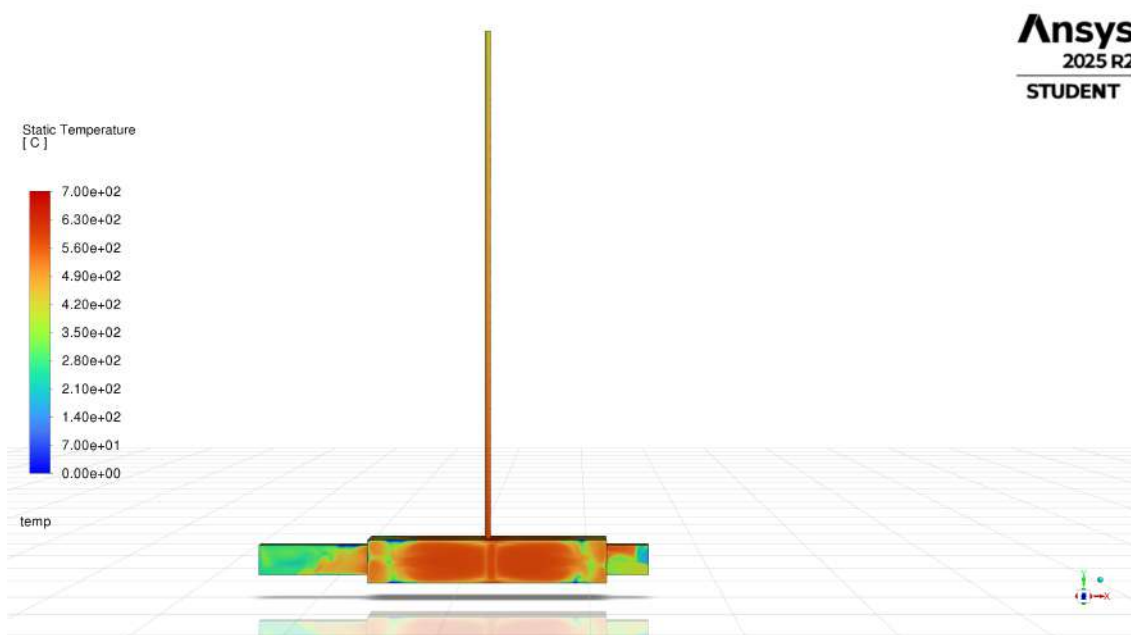
- **Distribución zonificada del calor:** La Figura 38 evidencia una distribución térmica dominada por un núcleo central de alta temperatura en la cámara de combustión, correspondientes al régimen de operación del quemador de GLP. Este núcleo se presenta con una forma simétrica respecto al eje longitudinal del horno, lo cual indica una

distribución de calor estable en el centro del horno. No obstante, se observan gradientes térmicos marcados hacia los extremos de la cámara, producto de las cortinas de aire, donde la temperatura predominante es la del chorro de aire inyectado.

La columna vertical asociada a la chimenea mantiene un perfil térmico prácticamente uniforme y en gradiente ascendente moderado, lo que indica que la extracción de gases calientes ocurre de manera constante y con velocidad suficiente para evitar condensación o acumulación. Sin embargo, la transferencia directa de calor hacia el ducto de extracción acentuaría las pérdidas energéticas al evacuar el calor antes de ser aprovechado por la carga.

Figura 38

HAT - Distribución de temperatura en la cámara de combustión.

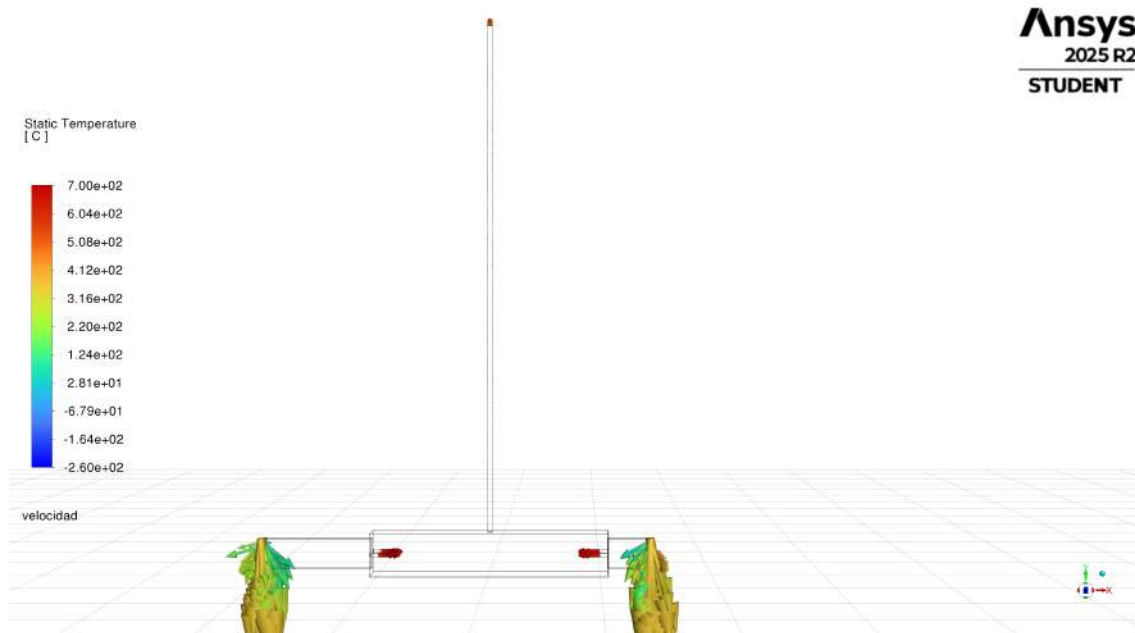


- **Control del aire y gases de combustión:** La Figura 39 presenta la vista lateral del HAT y los vectores de velocidad de los gases de combustión a través de las aperturas del horno, bajo condiciones estacionarias. Se observa el campo de velocidades asociado a los gases de combustión evidenciando un comportamiento claramente marcado por la cortina de aire en las aperturas de carga (derecha) y descarga (izquierda). Este patrón confirma la existencia de una barrera de presión dominante que favorece la expulsión del

flujo caliente por la chimenea y no por las aperturas de carga y descarga.

Figura 39

HAT - Vectores de velocidad de los gases de combustión.



4.4.2. Resultado de la validación

La Tabla 7 resume los valores obtenidos en los escenarios evaluados y permite cuantificar el efecto de la propuesta de mejora sobre la eficiencia térmica y el consumo energético del horno. Los resultados muestran un incremento de eficiencia del 31 % al 45 %, asociado a la reducción de pérdidas por convección y radiación, la disminución de aperturas y un patrón más eficiente de circulación de gases de combustión. La temperatura superficial de la carcasa se redujo de 160 °C a 100 °C, lo que contribuyó a disminuir la potencia requerida de 31.6 kW a 21.7 kW y el consumo de combustible de 24.8 kg/h a 17.0 kg/h. Sin embargo, la incorporación de una cortina de aire a 20 m/s y 350 °C demanda una potencia adicional de 23.8 kW, reduciendo la eficiencia global a valores cercanos al 40 %. Esta configuración modifica el comportamiento de los flujos: el caudal evacuado por la chimenea aumenta del 7 % al 16 %, mientras que en la salida se pasa de expulsar aproximadamente el 47 % de los gases a permitir el ingreso de un 30 % de aire precalentado. En conjunto, los resultados evidencian que la cortina de aire mejora la contención de gases, pero introduce un costo energético adicional que afecta el desempeño

térmico global del sistema.

Tabla 7

Comparación de desempeño térmico entre el horno inicial, la propuesta mejorada y la hipótesis esperada.

Indicador	Inicial	Propuesta sin cortina	Propuesta con cortina
Capacidad del horno [u/h]	75	75	75
Temperatura de carcasa [°C]	160	100	100
Potencia aprovechada [kW]	97	97	97
Pérdidas por convección [kW]	10.4	57.6	57.6
Pérdidas por radiación [kW]	11	98	98
Potencia total [kW]	316	217	243
Eficiencia [%]	31	45	42
Potencia de la niquelina [kW]	0	0	24.5
Consumo de combustible [kg/h]	24.8	17.0	17.0
Gases expulsados por chimenea [%]	2	7	16

4.5. Fase 4 - Evaluación económica de la propuesta de mejora

La presente sección desarrolla la evaluación económica de la propuesta de mejora del horno, con el fin de determinar su viabilidad técnica y financiera. El análisis se orienta a proporcionar a los responsables de la fábrica una base objetiva para la toma de decisiones, integrando los costos de inversión, la variación en los costos operativos y los beneficios económicos derivados de la mejora en la eficiencia térmica del sistema.

4.5.1. Alcance del análisis

La evaluación considera el impacto económico asociado a la implementación de la propuesta de mejora, incluyendo la inversión inicial requerida para su ejecución y los cambios esperados en los costos operativos. El estudio se centra en las variables de mayor influencia en el desempeño económico del horno: consumo de combustible, horas de operación, potencia requerida y costos derivados de la paralización del horno.

4.5.2. Inversión inicial - CAPEX

La inversión inicial corresponde al conjunto de rubros necesarios para ejecutar la mejora. Este valor incluye los costos de adquisición de materiales y equipos, la fabricación e instalación de componentes, la mano de obra especializada involucrada, las paradas operativas requeridas para la intervención y los costos de puesta en marcha. De esta forma, se establece la inversión total del proyecto (I_0), que constituye el valor base para el análisis de rentabilidad.

4.5.3. Costos operativos - OPEX

- **Costos actuales:** Los costos operativos actuales se encuentran fuertemente determinados por el consumo de GLP, las horas mensuales por paralización imprevista del horno y la necesidad de mantenimiento correctivo. Estos elementos permiten caracterizar el desempeño térmico-económico antes de la implementación de la propuesta.
- **Costos proyectados tras la mejora:** Luego de la aplicación de la propuesta, se consideran los nuevos costos operativos, entre ellos: el consumo reducido de GLP asociado al incremento de eficiencia térmica, la potencia requerida por los dispositivos adicionales incorporados en la mejora y la posible disminución en los costos de mantenimiento debido a una mejor confiabilidad del equipo.

4.5.4. Ahorros energéticos y económicos

A partir de la comparación entre el estado actual y el estado mejorado, se calcula el **Ahorro Anual Esperado** (S_t). Este valor se determina mediante la reducción en el consumo de combustible, la disminución del calor perdido hacia el ambiente y los beneficios adicionales asociados a un comportamiento térmico más estable. La reducción en la potencia requerida y la disminución del consumo de GLP constituyen los componentes principales del ahorro energético proyectado.

4.5.5. Indicadores de rentabilidad

Con base en la inversión inicial y los ahorros anuales estimados, se determina el período de recuperación o *payback* del proyecto:

$$\text{Payback} = \frac{I_0}{S_t} \quad (48)$$

Donde:

Payback Período de recuperación [años].

I_0 Inversión Total del Proyecto [usd].

S_t Ahorro Anual Esperado [usd].

4.5.6. Valor Actual Neto - VAN

El Valor Actual Neto (VAN) cuantifica el valor creado por un proyecto al traer a valor presente los flujos netos de caja futuros y restar la inversión inicial. Es la métrica primaria de decisión cuando el objetivo es maximizar valor económico.

Sea I_0 la inversión inicial, i la tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) y FC_t el flujo neto de caja en el año t , para un horizonte N :

$$\text{VAN}(i) = \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1+i)^t} - I_0. \quad (49)$$

Donde:

VAN Valor Actual Neto [usd].

FC_t	Flujo de Caja en el año t [usd].
i	Tasa mínima atractiva de retorno (TMAR) [%].
I_0	Inversión inicial [usd].
t	Período o año específico que se desea calcular[s.u.].
N	Vida útil del equipo[s.u.].

Construcción de los flujos FC_t . En proyectos de eficiencia térmica, FC_t suele componerse de:

$$FC_t = \Delta C_{\text{comb},t} + \Delta C_{\text{mant},t} - C_{\text{opex.ad},t} + V_{\text{res},t} \quad (50)$$

Donde:

VAN	Valor Actual Neto [usd].
$\Delta C_{\text{comb},t}$	Ahorro en combustible [usd].
$\Delta C_{\text{mant},t}$	Ahorro en mantenimiento [usd].
$C_{\text{opex.ad},t}$	Costos operativos adicionales [usd].
$V_{\text{res},t}$	Valor residual [usd].

De acuerdo con el alcance establecido, se ha omitido impuestos, financiamiento y efectos corporativos no observables.

Horizonte y valor residual. Para un equipo con vida útil técnica N , puede incluirse un valor residual V_{res} al final del periodo, el cual representa el monto recuperable al término de su operación, comúnmente asociado a su valor de reventa o chatarra.

Criterio de decisión.

- Si $VAN(i) > 0$: el proyecto **crea valor** y debe aceptarse (domina a alternativas con VAN menor).
- Si $VAN(i) = 0$: el proyecto es indiferente al umbral de rentabilidad exigido.
- Si $VAN(i) < 0$: el proyecto **destruye valor** al descontar a la TMAR y debe rechazarse.

4.5.7. Tasa Interna de Retorno - TIR

La Tasa Interna de Retorno (TIR) es la tasa que hace el VAN igual a cero; representa un rendimiento anualizado implícito del proyecto, bajo supuestos estándar.

Definición y ecuación característica. La TIR es la solución numérica de:

$$0 = \sum_{t=1}^N \frac{FC_t}{(1 + TIR)^t} - I_0. \quad (51)$$

Donde:

TIR	Tasa Interna de Retorno [s.u.].
FC_t	Flujo de Caja en el año t [usd].
I_0	Inversión inicial [usd].
t	Período o año específico que se desea calcular[s.u.].
N	Horizonte de evaluación o Vida útil del equipo[s.u.].

Criterio de decisión.

- Si $TIR \geq i$ (TMAR): el proyecto **es aceptable** (supera la rentabilidad mínima exigida).
- Si $TIR < i$: el proyecto **no es aceptable**.

4.5.8. Cálculo de la evaluación económica

Véase el presupuesto en la Tabla 32 para consultar el desglose completo del valor inicial I_0

Parámetros de cálculo

- Costo de la propuesta de mejora (I_0): \$ 50,389.34 usd.
- Reducción de consumo de GLP: de 24.8 [kg/h] a 17.0 [kg/h]; ahorro de 7.8 [kg/h].
- Régimen de operación: 565 h/año.
- Precio del GLP \$ 1.06546 [usd/kg].

- Precio del kilovatio hora \$ 0.09 [usd/kWh].
- Horizonte de evaluación: $N = 10$ años.
- Tasa de descuento: $i = 10\%$.

Tabla 8*Resumen de evaluación económica*

Concepto	Valor
Inversión inicial I_0	\$ 50,389.34
Ahorro anual GLP	\$ 4,695.48
VAN	\$ -31,353.49
TIR	-10%
Payback	10.7 años

5. Resultados y discusión

5.1. Análisis y discusión de los resultados del proceso de diseño y modelamiento

En esta sección se presentan y analizan los resultados obtenidos durante el proceso de diseño, modelamiento y validación de la propuesta de mejora para el horno de alivio de tensiones. Los siguientes apartados exponen las iteraciones realizadas al abordar los aspectos termodinámicos, fluidodinámicos y geométricos del sistema, así como un análisis comparativo entre las configuraciones alternativas de chimenea, la distribución de los quemadores, las modificaciones internas de geometría y las estrategias implementadas para el control de emisiones y del flujo de gases de combustión. El análisis integrado de estos elementos permitió establecer los criterios técnicos que sustentan el diseño final del horno, su desempeño térmico y el impacto de cada componente en la eficiencia y seguridad del proceso industrial.

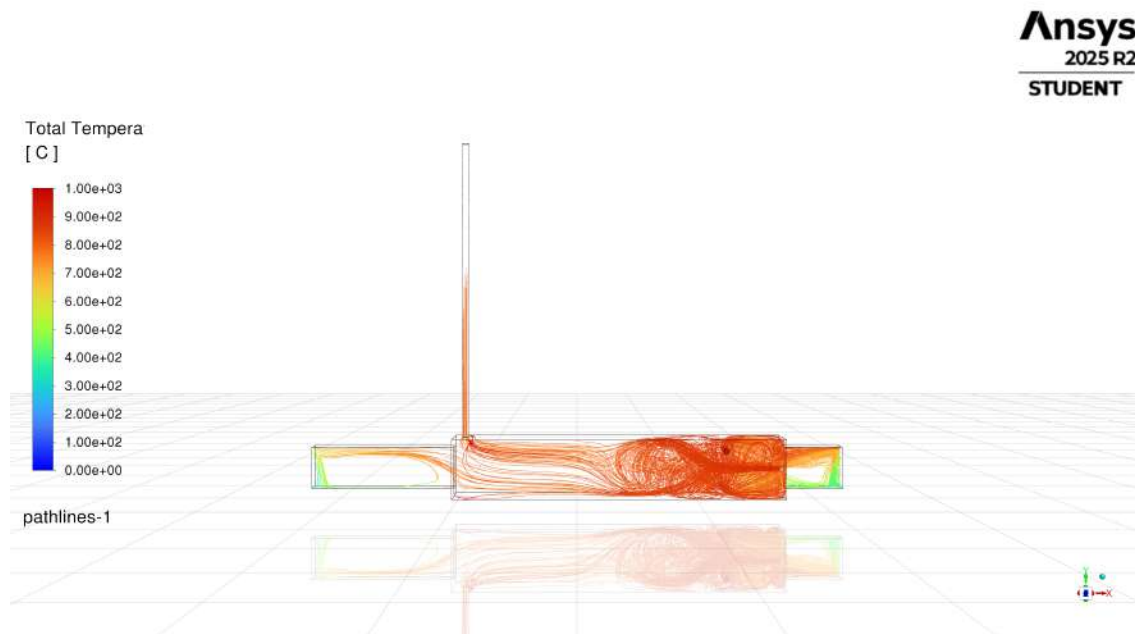
Síntesis de mediciones y diagnóstico: El diagnóstico integral combinó inspecciones de campo, análisis termográfico, mediciones de gases de combustión y simulaciones CFD del horno de alivio de tensiones (HAT). Las termografías evidenciaron pérdidas por la envolvente y zonas de fuga asociadas a las aberturas de carga/descarga; el análisis de gases confirmó gradientes térmicos y de composición en el ducto de salida; y el modelo CFD reprodujo los patrones de recirculación, las zonas de estancamiento y el arrastre de gases hacia las aberturas. En conjunto, los hallazgos sustentan que el factor predominante que condiciona el desempeño térmico y la calidad del aire en planta es el equilibrio de presiones y la gestión del flujo de gases calientes, más que las variaciones geométricas de la cámara.

Ubicación de la chimenea y efecto sobre el campo de flujo: Se evaluaron dos configuraciones para la campana y chimenea:

1. **Extremo opuesto a los quemadores.** La presión de tiro extrae principalmente los gases que circulan por la parte superior del horno, resultando insuficiente para inducir el ascenso de las líneas de flujo que se desplazan por la zona inferior. Esta configuración favorece un recorrido completo de los gases a lo largo de la cámara de combustión, por lo que puede considerarse viable dentro de la propuesta de mejora. El resultado de la simulación se muestra en la Figura 40.
2. **Chimenea centrada con campana longitudinal.** La extracción en el centro, acoplada a una campana extendida a lo largo del horno y ductos hacia el interior de la cámara, sobre carga, centro y descarga, proporciona el mejor control de evacuación, reduce la expulsión de gases hacia las aberturas, homogeniza la circulación y permite modular el tiro por tramo para acompañar el perfil térmico del proceso.

Figura 40

HAT - Flujo interno de gases de combustión, extracción forzada.



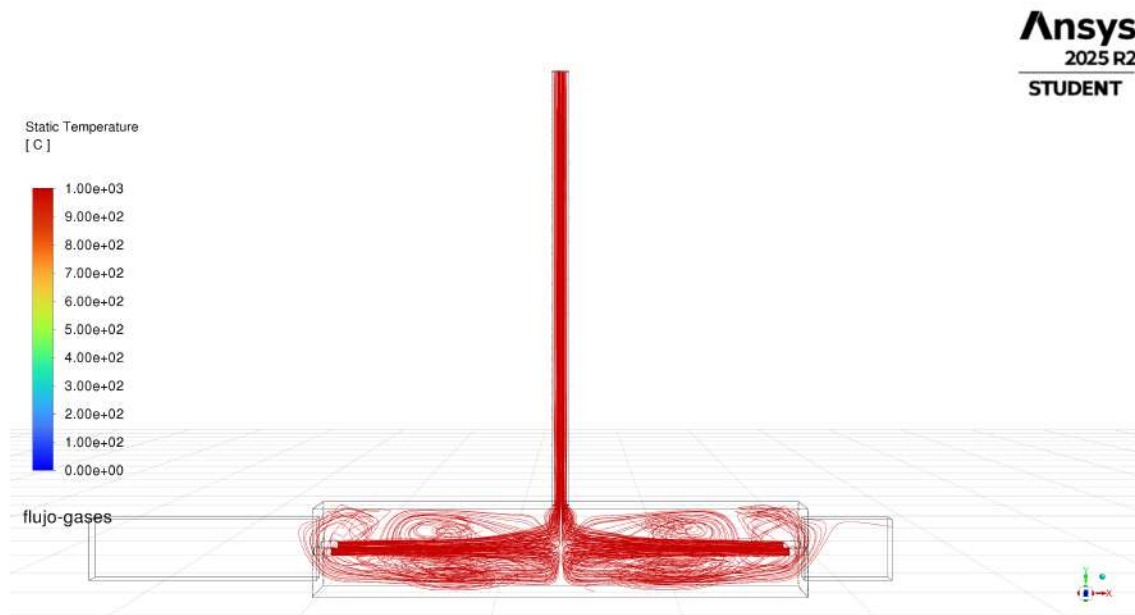
Nota. Nótese el comportamiento laminar predominante en la cámara de combustión y una mínima cantidad de líneas de flujo en las zonas de carga y descarga.

Bajo criterios termo-fluidodinámicos y de control operativo, la opción 3 permite un ajuste más robusto entre eficiencia, uniformidad térmica y minimización del arrastre de aire ambiente.

Extracción forzada, análisis y descarte: Se exploró la incorporación de extracción forzada de gases para suprimir por completo la salida por las aberturas como se observa en la Figura 41. Aunque la medida reduce la turbulencia global, introduce un mecanismo adverso: evacúa los gases de combustión antes de que transfieran calor a la carga, disminuyendo la convección y la radiación efectiva. El resultado neto es una penalización en la eficiencia térmica y un proceso más sensible al desempeño del ventilador de extracción. Dado que el horno es de boca abierta, la extracción forzada mitiga enormemente el fenómeno dominante de intercambio con el ambiente, por otra parte añade modos de falla: pérdida o exceso de tiro por mala calibración, aumento en el costo de mantenimiento. Por ello, se descartó su implementación.

Figura 41

HAT - Flujo interno de gases de combustión, extracción forzada.

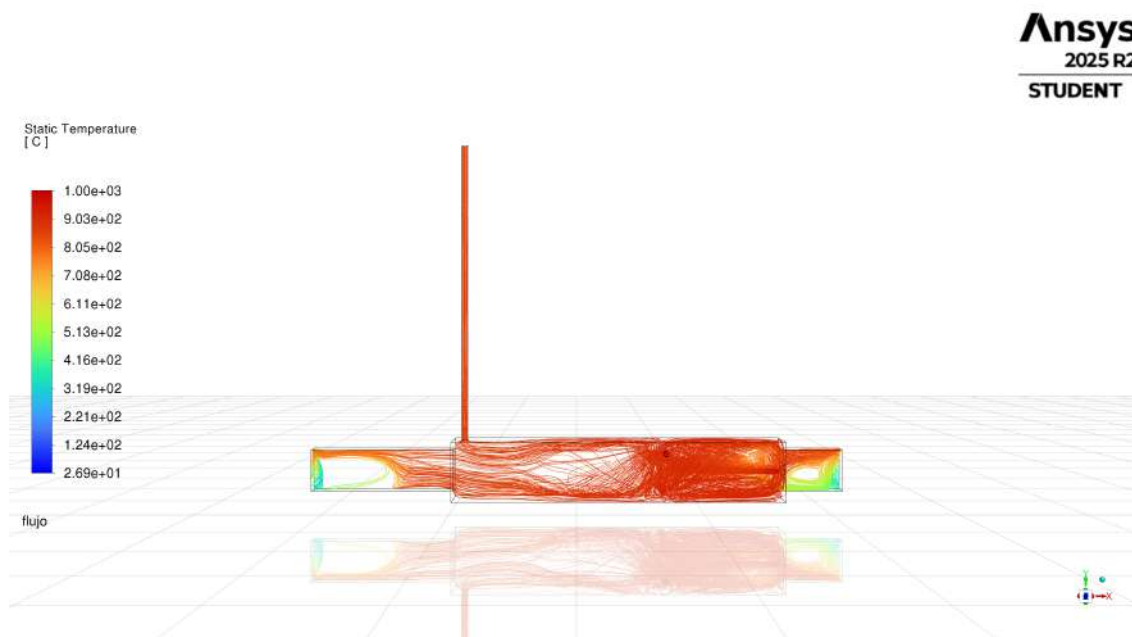


Nota. Nótese el comportamiento laminar predominante en la cámara de combustión y una mínima cantidad de líneas de flujo en las zonas de carga y descarga.

Disposición de quemadores y transferencia de calor: Se ensayaron reubicaciones para maximizar turbulencia útil y circulación, considerando también la transferencia por radiación de llama:

- **Configuración adoptada.** Se conservó la disposición original de los quemadores, dos en el extremo de carga y dos en el de descarga, ajustando únicamente su centrado respecto del eje vertical. Esta configuración genera chorros enfrentados que inducen vórtices y amplias zonas de circulación, además de orientar la llama a lo largo del eje longitudinal, favoreciendo la transferencia radiativa hacia la carga y reduciendo el *impingement* sobre superficies.
- **Quemadores transversales.** En contraste, la configuración con quemadores transversales requirió aumentar las dimensiones de la cámara para evitar *impingement* y añadir unidades adicionales para recuperar uniformidad, incrementando la complejidad del sistema, así como los costos operativos (OPEX) y de inversión (CAPEX), sin beneficios proporcionales.

La Figura 5.1 muestra un flujo marcadamente turbulento en el extremo de carga, donde se ubican los quemadores, y un flujo predominantemente laminar hacia el extremo de descarga.



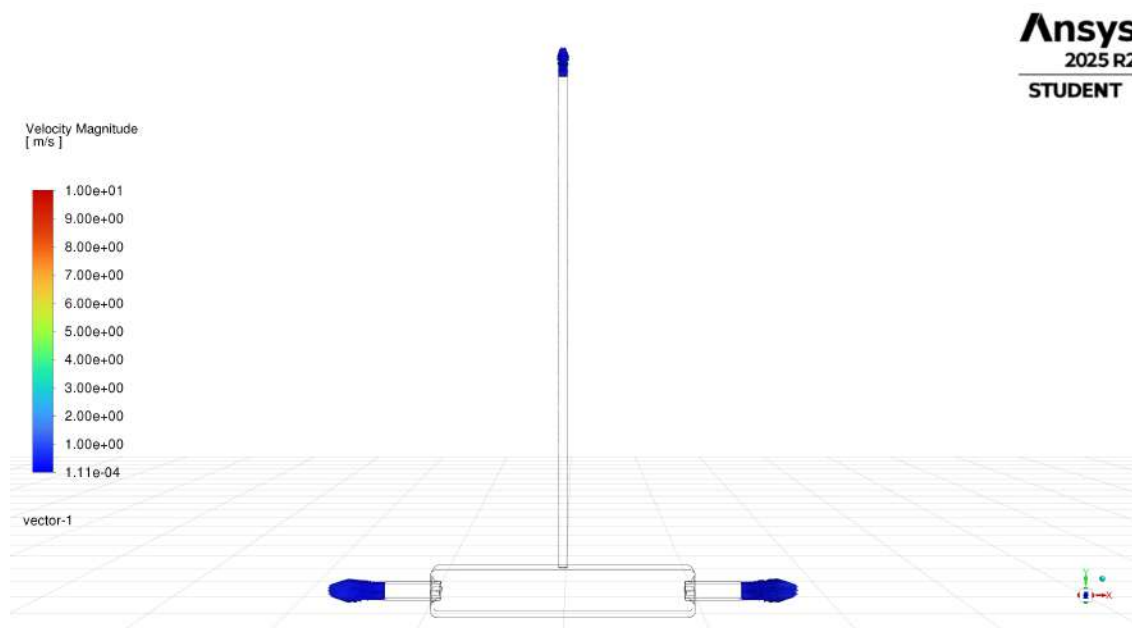
Nota. Se observan quemadores ubicados en el extremo de carga orientados longitudinalmente, así como quemadores centrales dispuestos con orientación transversal dentro de la cámara..

Ajustes geométricos en aberturas y aristas: Dos líneas de mejora geométrica fueron evaluadas:

1. **Reducción de aberturas con cilindro en posición horizontal.** La disminución de áreas en carga y descarga no produjo mejoras apreciables en la contención de los gases de combustión al interior; el intercambio dominante continuó regido por la diferencia de presiones entre cámara y ambiente como se muestra en la Figura 43.

Figura 43

HAT - Vectores de velocidad en las aperturas del horno.

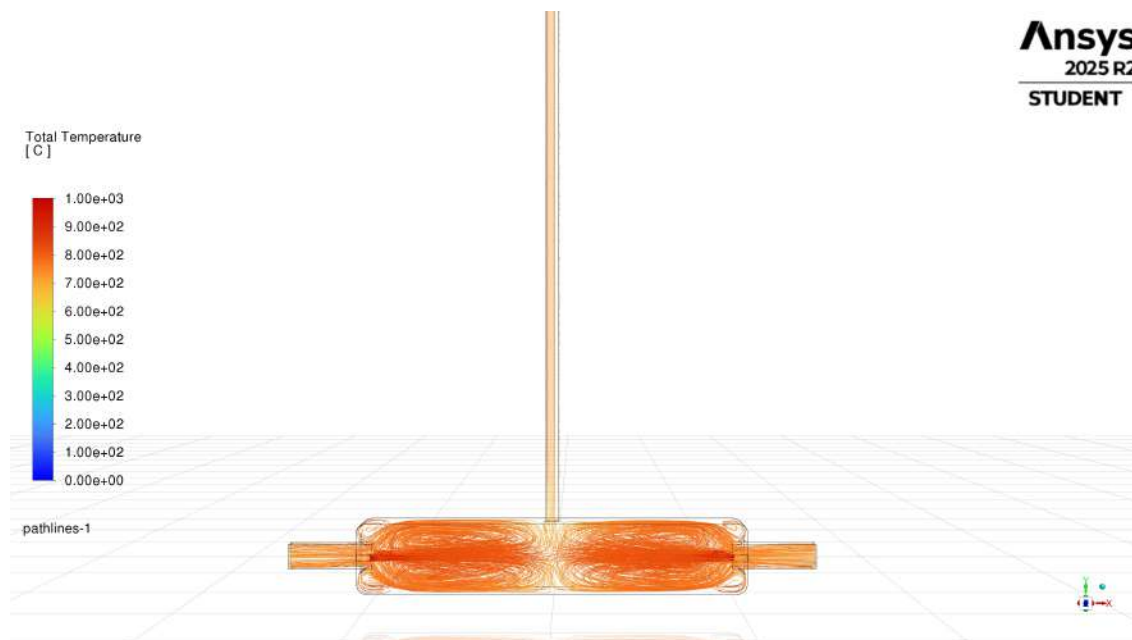


Nota. Se observa una disminución en el área de las aberturas de carga y descarga; sin embargo, el flujo de gases expulsados por estas sigue siendo superior al que asciende por la chimenea

2. **Redondeo/curvatura de aristas internas.** Las aristas redondeadas en ambos extremos de la cámara de combustión, junto con la prolongación de las bocas de carga y descarga hacia el interior, buscaban conducir la circulación de gases hacia el interior del horno y alejarlos de las aberturas. Sin embargo, la validación no evidenció mejoras significativas: el gradiente de presión y la geometría abierta del sistema predominan sobre los efectos locales de contorno, tal como se observa en la Figura 44.

Figura 44

HAT - Flujo interno de gases de combustión.



Nota. Nótese la escasa cantidad de líneas de flujo que ascienden por la chimenea, en contraste con la alta concentración de trayectorias que se dirigen hacia las aberturas de carga y descarga.

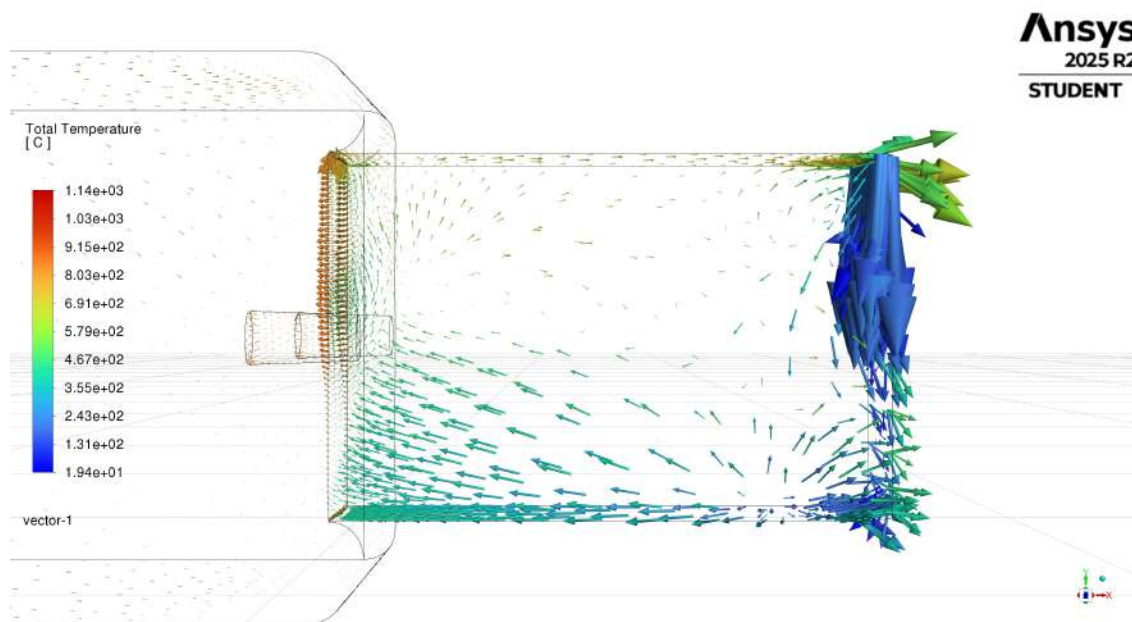
En ambos casos, el beneficio marginal no compensa la intervención; la prioridad debe permanecer en el control del tiro y la gestión seccional de la evacuación.

Cortina de aire, desempeño termo–ambiental y costo de oportunidad: La incorporación de una cortina de aire en la boca del horno fue evaluada como una barrera dinámica destinada a mitigar la fuga de gases calientes. Su implementación exige ventiladores dedicados, control preciso de caudal y temperatura, boquillas diseñadas para operar a altas temperaturas y sistemas adicionales de protección térmica, lo que incrementa la complejidad técnica y los costos de inversión, operación y mantenimiento.

A pesar de ello, en un horno abierto la cortina de aire no elimina el fenómeno dominante de intercambio con el ambiente, limitado por el gradiente de presión y la geometría abierta del sistema. Como se observa en la Figura 45, persisten vectores de magnitud apreciable apuntando hacia el exterior, lo que evidencia la eficacia parcial de esta estrategia.

Figura 45

HAT - Vectores de velocidad en la zona de precalentamiento.



Nota. Nótese la escasa cantidad de líneas de flujo que ascienden por la chimenea, en contraste con la alta concentración de trayectorias que se dirigen hacia las aberturas de carga y descarga.

La validación numérica mostró, no obstante, una mayor contención de gases de combustión y una reducción significativa de su fuga al exterior. La penalización energética proviene del calentamiento del flujo de la propia cortina, que reduce la eficiencia térmica global del sistema de aproximadamente $\sim 45\%$ a $\sim 42\%$. Aun así, el beneficio ambiental y ocupacional, con menor material particulado en el entorno de trabajo, puede justificar su adopción en escenarios donde el control de emisiones y la seguridad operacional sean prioritarios.

En síntesis, la cortina de aire se perfila como medida operativa, sacrifica una fracción de rendimiento energético para ganar en seguridad industrial.

5.2. Diseño final del horno de alivio de tensiones

El proceso de análisis desarrollado en la Sección 5.1 permitió consolidar la propuesta final de diseño del horno, la cual se presenta de forma integral en el Anexo E. El plano 2/3 expone la configuración general del sistema, mientras que el plano 3/3 detalla el despiece, las dimensiones y los materiales especificados para cada componente. Este diseño corresponde al

Tabla 9*Comparativa de desempeño con y sin cortina de aire*

Indicador	Sin cortina	Con cortina
Contención de gases hacia planta	Baja	Media
Eficiencia térmica global	~ 45 %	~ 42 %
Complejidad del sistema	Baja	Alta
Modos de falla adicionales	No	Sí
Calidad del aire en entorno operativo	Baja	Media

resultado de las iteraciones realizadas en las Fases 2 y 3, incorporando exclusivamente aquellas configuraciones que evidenciaron un desempeño superior respecto al estado inicial del horno.

5.3. Integración funcional del sistema

El diseño final del horno mantiene una cámara de combustión de geometría rectangular, optimizada para maximizar la transferencia de calor por radiación y convección. Aristas rectas para facilitar la construcción del revestimiento interno.

Los cuatro quemadores Baltur se distribuyen en pares en las zonas de carga y descarga, con un alineamiento corregido respecto al eje vertical. Esta corrección permite incrementar la turbulencia interna, potenciar el mezclado aire–combustible y mejorar la distribución del flujo térmico sin comprometer la estabilidad de la llama.

5.4. Sistema de evacuación de gases y mejoras estructurales

El diseño incorpora una chimenea con campana extendida a lo largo de todo el horno, fabricada en acero inoxidable 316 con un espesor de 1.5 mm. Su ubicación en posición central permite una captación más uniforme de los gases de combustión y reduce la entrada de aire frío a través de las aberturas de carga y descarga. Esta geometría extendida facilita además la integración de compuertas de regulación sectorizadas, que permiten ajustar el caudal de extracción según las condiciones de operación y mantener el equilibrio térmico del sistema.

Desde el punto de vista estructural, la carcasa, fabricada igualmente en acero inoxidable

316 de 1.5 mm de espesor, mejora la estabilidad mecánica del conjunto y prolonga la vida útil del equipo frente a ciclos térmicos repetitivos. El refuerzo estructural se compone de tubo cuadrado de 50×50×2 mm en acero A36 en las caras laterales e inferior, mientras que en la cara superior, donde se ubica la campana, se seleccionó acero inoxidable 316 debido a la exposición a temperaturas elevadas debido a la conducción de la cadena de transporte de los cilindros.

5.5. Cortina de aire

Se implementó una cortina de aire con una sección de 35 × 1 cm, ubicada en la arista superior de las aberturas de carga y descarga, la cual descarga un chorro de aire a 15 m/s, previamente calentado a 350 °C. Las boquillas se diseñan en acero inoxidable 316, con bordes suavizados para minimizar pérdidas de carga y evitar concentraciones de tensión térmica.

El sistema es alimentado por ventiladores centrífugos capaces de suministrar 139 CFM, dimensionados para vencer una presión estática de 0.5 inWG, garantizando así un flujo estable y suficiente para conformar la barrera aerodinámica requerida para la contención de gases calientes.

6. Conclusiones y Recomendaciones

6.1. Conclusiones

El presente trabajo permitió desarrollar una propuesta integral de mejora para el horno de alivio de tensiones (HAT) de la empresa TECNERO S.A., combinando criterios de termodinámica, transferencia de calor, dinámica de fluidos y selección de materiales refractarios. A partir del análisis experimental, numérico y conceptual se obtuvieron las siguientes conclusiones:

- a) **Optimización térmica y fluidodinámica.** La reconfiguración de la cámara de combustión y la evaluación de distintas posiciones de la chimenea demostraron que la ubicación central ofrece un control más eficiente sobre la evacuación de gases. Esta disposición permite una mejor distribución del flujo, facilita el uso de compuertas de regulación y capta los gases de manera uniforme a lo largo de la cámara, reduciendo gradientes térmicos y mejorando la estabilidad del proceso.

- b) **Efecto de la posición de los quemadores.** Las simulaciones y pruebas realizadas confirmaron que la configuración original de los cuatro quemadores, dos en la zona de carga y dos en la de descarga, es la más adecuada. Esta disposición favorece la turbulencia, incrementa la transferencia por convección y radiación y garantiza una llama longitudinal estable que mejora el calentamiento uniforme de los cilindros. La alternativa transversal fue descartada debido al riesgo de *impingement* y al incremento en la complejidad del sistema.
- c) **Evaluación de la geometría y pérdidas por radiación.** La reducción de las aberturas de carga y descarga no produjo mejoras significativas en el desempeño térmico, dado que el fenómeno dominante es la diferencia de presión entre el interior del horno y el ambiente exterior. Asimismo, las modificaciones curvas en las aristas internas no ofrecieron beneficios relevantes en la recirculación de gases, confirmando que la geometría tiene un efecto secundario frente a las variables de presión y caudal.
- d) **Comportamiento de la extracción de gases.** La implementación de una extracción forzada fue descartada, ya que eliminaba la turbulencia natural de la cámara, reduciendo la transferencia de calor antes de alcanzar la carga. Además, este sistema incrementaba el consumo energético y la complejidad del mantenimiento, sin representar una mejora térmica global.
- e) **Desempeño de la cortina de aire.** El análisis numérico evidenció que la cortina de aire mejora la contención de gases de combustión y reduce la fuga hacia el ambiente, incrementando la seguridad y la calidad del aire en el entorno laboral. No obstante, su implementación implica una penalización en la eficiencia térmica global, pasando de un 45 % a aproximadamente 42 %, debido a la energía requerida para calentar y mantener el flujo de aire. A pesar de ello, los beneficios ambientales y operativos compensan el costo energético en instalaciones donde el control de emisiones es prioritario.
- f) **Eficiencia y viabilidad técnica.** La validación numérica confirmó una distribución de temperatura seccionada, logrando la temperatura objetivo de 700 °C en la zona de combustión, una temperatura de 350 °C en la zona de enfriamiento y 300 °C para la zona de precalentamiento. No se evidenciaron zonas frías que puedan alterar el proceso, una reducción de pérdidas energéticas y un incremento en la

eficiencia térmica del 31 % al 45 % para la propuesta sin cortina. La incorporación de materiales refractarios adecuados, el rediseño del aislamiento y la optimización del flujo gaseoso garantizan la viabilidad técnica y económica de la mejora.

g) **Impacto industrial.** La propuesta desarrollada contribuye directamente a la sostenibilidad operativa de la empresa, mediante la reducción del consumo de combustible, el aumento de la durabilidad del revestimiento refractario y la mejora en la seguridad ocupacional. Estos resultados refuerzan la importancia de integrar la simulación CFD y los balances energéticos en el rediseño de equipos térmicos industriales.

h) **Conclusión de la evaluación económica.**

El análisis económico realizado evidencia que la propuesta de mejora no resulta financieramente viable bajo las condiciones actuales de operación y precios de la energía. A pesar de que la intervención permite una reducción anual en el consumo de GLP equivalente a \$4,695.48, este ahorro es insuficiente para recuperar la inversión inicial de \$50,389.34 dentro del horizonte evaluado. El Valor Actual Neto (VAN) obtenido es negativo (\$-31,353.49), lo que indica que el proyecto destruye valor respecto a la tasa mínima de rendimiento exigida del 10 %. Asimismo, la Tasa Interna de Retorno (TIR) calculada es de -10 %, muy por debajo del costo de oportunidad del capital y el periodo de recuperación o *payback* asciende a 10.7 años, superando ampliamente la vida útil operativa esperada del equipo. En conjunto, estos indicadores financieros demuestran que la mejora propuesta no constituye una alternativa económicamente recomendable en las condiciones actuales de operación y demanda térmica del horno.

6.2. Recomendaciones

A partir de los resultados obtenidos y de las conclusiones derivadas del estudio, se formulan las siguientes recomendaciones técnicas y de gestión:

- a) **Monitoreo continuo.** Implementar un sistema de monitoreo térmico permanente mediante termopares redundantes y cámaras termográficas infrarrojas, para detectar desviaciones de temperatura y pérdidas energéticas a lo largo del ciclo operativo.
- b) **Mantenimiento predictivo.** Adoptar un programa de mantenimiento basado en análisis predictivo, utilizando inspecciones termográficas periódicas y registros de

- eficiencia de combustión, con el fin de anticipar fallos en revestimientos, juntas y quemadores.
- c) **Optimización del sistema de combustión.** Evaluar la posibilidad de incorporar quemadores modulantes con control proporcional de aire–combustible, lo que permitiría mejorar la estabilidad térmica, reducir emisiones de CO y aumentar la eficiencia global del horno.
 - d) **Mejoras estructurales.** Reforzar las zonas críticas del revestimiento metálico y revisar los soportes de la estructura externa para compensar dilataciones térmicas, evitando deformaciones que comprometan la estanqueidad del horno.
 - e) **Aplicación selectiva de la cortina de aire.** Considerar la instalación de la cortina de aire priorizando el control de emisiones hacia el interior de la planta, más que la eficiencia térmica. Su uso debe acompañarse de un sistema de control automático de caudal y temperatura.
 - f) **Capacitación técnica.** Capacitar al personal operativo en el manejo y mantenimiento del horno, control de combustión y seguridad industrial, fortaleciendo la gestión energética de la planta y garantizando la correcta operación de los equipos.
 - g) **Escalabilidad y replicabilidad.** Extender los resultados de este estudio a otros equipos térmicos de la empresa, replicando la metodología de diagnóstico, modelado CFD y validación energética como base para un plan integral de eficiencia industrial.

Conclusión general. En síntesis, la investigación demuestra que la integración de metodologías numéricas y experimentales permite diseñar soluciones técnicamente robustas y económicamente viables para hornos industriales. El caso del HAT de TECNERO S.A. evidencia que una correcta caracterización del sistema, combinada con análisis CFD y una selección adecuada de materiales, puede mejorar sustancialmente la eficiencia térmica, reducir costos operativos y extender la vida útil del equipo, aportando al desarrollo sostenible del sector metalmecánico ecuatoriano.

Referencias

- AENOR. (2021). Une-en 13384-1:2021. chimeneas. parte 1: Cálculo de chimeneas para aparatos de calefacción [Manual de software informático]. (Disponible en: <https://www.en.une.org/encuentra-tu-norma/busca-tu-norma/norma?c=N0066787>)
- AislamientoIndustrial. (2024). *Manta de fibra cerámica*. Descargado de <https://aislamientoindustrial.com/wp-content/uploads/2024/09/Ficha-tecnica-Manta-ceramica-KINGWOOL%E2%84%A2%E2%84%B8%8F.pdf> ([Internet; descargado 10-diciembre-2024])
- Altair. (s.f.). *Fluids and thermal applications*. Descargado de <https://altair.com/fluids-thermal-applications> (Consultado el 9 de febrero de 2025)
- Ansys. (s.f.). *Heat exchangers simulation application*. Descargado de <https://www.ansys.com/applications/heat-exchangers> (Consultado el 9 de febrero de 2025)
- Auces, E. A., y Rodríguez, J. A. (2003). Cálculo de las necesidades de energía en un horno de relevo de esfuerzos / energy needs calculation in an effort relieve kiln. *Revista Ciencia e Ingeniería*, 24(3).
- Bajt Leban, M., Vončina, M., Kosec, T., Tisu, R., Barborič, M., y Medved, J. (2023). Comparison of cycling high temperature corrosion at 650°C in the presence of nacl of various austenitic stainless steels. *Oxidation of Metals*, 99(1–2), 63–77. Descargado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11085-022-10138-y> doi: 10.1007/s11085-022-10138-y
- Baltur S.p.A. (2025). *Btg*. <https://www.baltur.com/intl/es/serie/btg/>. (Recuperado el 16 de agosto de 2025)
- Burja, J., Šetina Batič, B., Žužek, B., y Balaško, T. (2022). High-temperature oxidation of boiler steels at 650 °C. *Oxidation of Metals*, 97(1-2), 1–25. Descargado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s11085-021-10094-z> doi: 10.1007/s11085-021-10094-z
- Burja, J., Šetina Batič, B., Žužek, B., y Balaško, T. (2023). High-temperature oxidation of boiler steels at 650 °C. *Metals*, 13(11), 1887. Descargado de <https://www.mdpi.com/2075-4701/13/11/1887> doi: 10.3390/met13111887
- CambridgeDictionary. (s.f.). *Furnace*. Descargado de <https://dictionary.cambridge.org/es/diccionario/ingles-espanol/furnace> (Consultado el 2 de febrero de 2025)
- Cantú, A. (2024). *Tipos de aislamiento para hornos industriales: Cómo elegir el mejor*.

- Descargado de <https://www.nutecbickley.com/es/newsroom/articulos/tipos-de-aislamiento-para-hornos-industriales-como-elegir-el-mejor> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- CCEWOOL (fabricante). (2024). *Ccewool® modules – technical data sheet*. (Ficha técnica de propiedades térmicas y densidades (documento adjunto).)
- Cedinox. (2025). *Resistencia a la corrosión del acero inoxidable a altas temperaturas*. Descargado de <https://www.cedinox.es/es/publicaciones/noticias/Resistencia-a-la-corrosion-del-acero-inoxidable-a-altas-temperaturas> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- CNRH Refractories. (2024). *Cnrh refractories: High-performance refractory materials*. Descargado de <https://www.cnrhrefractories.com/?campaignid=522000862&device=c&keyword=refractory%20company&msclkid=80b525d1a2b2106f356d4ddf2c8ed4e0> (Consultado en abril de 2025)
- COMSOL. (s.f.). *Heat transfer module*. Descargado de <https://www.comsol.com/heat-transfer-module> (Consultado el 9 de febrero de 2025)
- Din 51060:2000-06: Norma para materiales refractarios. (2000). (Disponible en: [URL o información adicional sobre la norma])
- Ebben, A., y Carlson, C. (2023). *Everything you need to know on rotary kiln refractory*. Descargado de <https://feeco.com/everything-you-need-to-know-on-rotary-kiln-refractory/> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- EMIS. (2025). *Tecnología en acero tecnero s.a. - perfil de la empresa*. Descargado de https://www.emis.com/php/company-profile/EC/Tecnologia_en_Acero_Tecnero_SA_es_3951131.html (Consultado el 29 de enero de 2025)
- ENGAS. (2021a). *n-butano C_4H_{10} – ficha técnica*. Descargado de <https://engas.cl/wp-content/uploads/2021/01/n-Butano-Ficha-Tecnica.pdf> (Recuperado de <https://engas.cl/wp-content/uploads/2021/01/n-Butano-Ficha-Tecnica.pdf>)
- ENGAS. (2021b). *Propano C_3H_8 – ficha técnica*. Descargado de <https://engas.cl/wp-content/uploads/2021/01/Propano-Ficha-tecnica.pdf> (Recuperado de <https://engas.cl/wp-content/uploads/2021/01/Propano-Ficha-tecnica.pdf>)
- Filipponi, M., Rossi, F., Presciutti, A., De Ciantis, S., Castellani, B., y Carpinelli, A. (2016). Thermal analysis of an industrial furnace. *Energies*, 9(10), 833.
- Grosenick, C. (2003). *Sulfidation: High temperature turbine blade corrosion*. Aviation Pros. Descargado de <https://www.aviationpros.com/> (Consultado en abril de 2025)

- Harbison Walker Refractories Company. (2005). *Harbison walker refractories handbook*. Descargado de <https://www.mha-net.org/docs/Harbison%20Walker%202005%20Handbook.pdf> (Consultado en abril de 2025)
- Industries, A. (s.f.). *1018 / a36 steel properties*. <https://us.abrams-industries.com/steel/tool-steel/1018-a36>. (Consultado el 19 de octubre de 2025. Valor de calor específico: 486 J/kg·K para 50–100°C)
- Inoriza, R. (2003). Introducción a los materiales refractarios. *Técnica Industrial*, 248, 54–57.
- International Molybdenum Association (IMO). (2012). *Directrices prácticas para la fabricación de los aceros inoxidables dúplex* (1.ª ed.). Londres, Reino Unido: International Molybdenum Association. Descargado de https://www.imoa.info/download_files/stainless-steel/Duplex_Stainless_Steel_Spanish.pdf (Consultado el 27 de abril de 2025)
- JPW Industrial Ovens & Furnaces. (2024). *Industrial oven and furnace trends for 2025: Advancing toward a more sustainable, customizable and connected future*. Descargado de <https://www.jpwdesign.com/industrial-oven-and-furnace-trends-for-2025/> (Consultado el 19 de abril de 2025)
- JUCOS. (2025). *Research status of corrosion resistance of refractory materials in waste incinerators*. Descargado de <https://www.jucosfirebrick.com/info/research-status-of-corrosion-resistance-of-ref-78171185.html> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- Jucos Refractory. (2024). *Shape refractory products*. Descargado de https://www.jucosrefractory.com/shape-refractory/?gad_source=1&gbraid=0AAAAABc2B5-QfZr3PFiMMRg1I0Qw86igB&gclid=CjwKCAjwq7fABhB2EiwAwk-YbIUbmM_tpsK6qB0E2kdqiht0o_toX4lRpk-f34BcH8suRCP0YwsjJR0CexMQAvD_BwE (Consultado en abril de 2025)
- Lee, W. E., y Moore, R. E. (1998). Evolution of in situ refractories in the 20th century. *Journal of the American Ceramic Society*, 81(6), 1385–1410. Descargado de <https://doi.org/10.1111/j.1151-2916.1998.tb02497.x> doi: 10.1111/j.1151-2916.1998.tb02497.x
- Lu, W. (2011). Application and practice of ceramic fiber block technology in industrial furnaces. *Baosteel Technical Research*.
- Moran, M. J., Shapiro, H. N., Boettner, D. D., y Bailey, M. B. (2020). *Principles of engineering thermodynamics* (9th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Moreno Franco, J. D. (2007). *Evaluación y comparación del desgaste corrosivo a altas*

- temperaturas en los aceros inoxidable austeníticos, aisi - sae 304h, aisi - sae 316l y acero al carbono 1020* (Trabajo de grado, Universidad Tecnológica de Pereira, Pereira, Colombia). Descargado de <https://repositorio.utp.edu.co/server/api/core/bitstreams/0040efa5-385f-43b7-b6d0-3013eed6af96/content> (Director: José Luis Tristanco R.)
- Mullinger, P., y Jenkins, B. (2014). *Industrial and process furnaces* (2nd ed.). Elsevier Ltd.
- Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., y Huebsch, W. W. (2013). *Fundamentals of fluid mechanics* (7th ed.). Hoboken, NJ, USA: Wiley. (Libro de referencia ampliamente utilizado en cursos universitarios de mecánica de fluidos.)
- NASA Earthdata. (2025). *Air mass/density*. Descargado de <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/atmosphere/air-mass-density> (Recuperado de <https://www.earthdata.nasa.gov/topics/atmosphere/air-mass-density>)
- Nickel Institute. (2003). *High-temperature characteristics of stainless steels*. American Iron and Steel Institute. Descargado de <https://nickelinstitute.org/library/high-temperature-characteristics-of-stainless-steels/> (Consultado en abril de 2025)
- OpenFOAM. (s.f.). *Openfoam engineering services*. Descargado de <https://www.openfoam.com/products-services/openfoam-engineering-services> (Consultado el 9 de febrero de 2025)
- Ortuño Arzate, S. (2009). *El mundo del petróleo: Origen, usos y escenarios*. México: Fondo de Cultura Económica.
- Outokumpu. (2013). *Stainless steel: Materials handbook*. Finlandia: Outokumpu Oyj.
- Pekař, M. (2024). *The essentials of thermodynamics*. Springer Nature Switzerland AG. Descargado de <https://doi.org/10.1007/978-3-031-60321-1> doi: 10.1007/978-3-031-60321-1
- RS New Refractory. (2024). *¿qué materiales refractarios se utilizan en los incineradores de azufre?* Descargado de <https://www.rsnewrefractory.com/es/refractory-materials-in-sulfur-incinerators/> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories. (2024a). *Cryston® cu max - refractory brick image*. Descargado de https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/sites/hps-mac3-cma-pcr/files/styles/832x566/public/assetbank_media/Non-Ferrous-brick-circle-Copper-Cryston-CU-Max-3263261-212327.png.webp?itok=8VNZJbzu (Imagen corporativa. Recuperado

- el 19 de abril de 2025, de Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories)
- Saint-Gobain Performance Ceramics & Refractories. (2024b). *Saint-gobain performance ceramics & refractories – official website*. Descargado de <https://www.ceramicsrefractories.saint-gobain.com/> (Recuperado el 19 de abril de 2025)
- Schmidtmeier, D., Kockegety-Lorenz, R., Buhr, A., Schnabel, M., y Dutton, J. (2012). *Material design for new insulating lining concepts*. Proceedings of the 55th International Colloquium on Refractories, Aachen, Germany. (Consultado en abril de 2025)
- Schmitz, M. (2023). *Corrosión a alta temperatura en álabes de turbina (sulfuración)*. Descargado de <https://blog.foerstergroup.com/es/component-testing/corrosion-a-alta-temperatura-en-alabes-de-turbina-sulfuracion> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- Serway, R. A., y Jewett, J. W. (2014). *Physics for scientists and engineers* (9th ed.). Boston, MA: Cengage Learning.
- SimScale. (s.f.). *Thermal analysis simulation*. Descargado de <https://www.simscale.com/product/thermal-analysis/> (Consultado el 9 de febrero de 2025)
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C., y Van Wylen, G. J. (2013). *Fundamentos de termodinámica* (7.ª ed.). México D.F.: Wiley.
- Sonntag, R. E., Borgnakke, C., y Wylen, G. J. V. (2003). *Fundamentals of thermodynamics* (6th ed.). New York, NY: Wiley.
- SRI. (2025). *Registro Único de contribuyentes (ruc) - tecnología en acero tecnero s.a.* Descargado de <https://sri-en-linea.com/ruc/0190382257001> (Consultado el 29 de enero de 2025)
- SteelPRO Group. (2024). *Acero inoxidable 314: características, propiedades, procesos, aplicaciones*. Descargado de <https://steelprogroup.com/es/stainless-steel/grades/grade-314/> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- SteelPro Group. (2024). *Comportamiento de los aceros inoxidables a alta temperatura*. Descargado de <https://www.steelprogroup.com/> (Consultado en abril de 2025)
- Sánchez Pastén, M. (2016). *Corrosión a altas temperaturas*. México, D.F.: Grupo Editorial Éxodo.
- Tavira, C. (2023). *Fibra cerámica para hornos industriales: Óptimo rendimiento térmico*. Descargado de <https://nutec.com/es/newsroom/articulos/fibra-ceramica-para-hornos-industriales> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- Turns, S. R. (2013). *An introduction to combustion: Concepts and applications* (3rd ed.).

- New York: McGraw-Hill Education.
- U.S. Standard. (1976). *U.s. standard*. Washington, D.C.: U.S. Government Printing Office.
(Molar mass of air $M = 0.0289644$ kg/mol)
- U.S.D.o.E. (s.f.). *Fuel properties comparison*. Descargado de <https://afdc.energy.gov/fuels/properties>
- Van den Berg, B. (2015). *Heat recovery from corrosive flue gas*. Descargado de <https://www.digitalrefining.com/article/1001128/heat-recovery-from-corrosive-flue-gas> (Consultado el 27 de abril de 2025)
- Villalba Weinberg, A., Varona, C., Chaucherie, X., Goeuriot, D., y Poirier, J. (2017). Corrosion of al₂o₃-sio₂ refractories by sodium and sulfur vapors: A case study on hazardous waste incinerators. *Ceramics International*, 43(7), 5743–5750. Descargado de https://www.researchgate.net/publication/312650257_Corrosion_of_Al2O3-SiO2_refractories_by_sodium_and_sulfur_vapors_A_case_study_on_hazardous_waste_incinerators (Consultado el 27 de abril de 2025) doi: 10.1016/j.ceramint.2017.01.116
- Zhao, J., Ma, L., Zayed, M. E., Elsheikh, A. H., Li, W., Yan, Q., y Wang, J. (2021). Industrial reheating furnaces: A review of energy efficiency assessments, waste heat recovery potentials, heating process characteristics and perspectives for steel industry. *Process Safety and Environmental Protection*, 147, 1209–1228.
- Çengel, Y. A., y Boles, M. A. (2019). *Thermodynamics: An engineering approach* (9th ed.). New York, NY: McGraw-Hill Education.

ANEXOS

Anexo A: Tipos de Hornos

Tabla 10

Tipos de hornos industriales. (Mullinger y Jenkins, 2014)

Nº	Tipo de horno en inglés	Traducción al español
1	Watertube Boilers	Calderas acuotubulares
2	Water or Thermal Fluid Heaters	Calentadores de agua o fluido térmico
3	Rotary Kiln, Moving or Rotary Hearth	Horno rotatorio, hogar móvil o rotativo
4	Open Hearth Furnace	Horno abierto
5	Fixed or moving grate with steam tubes	Parrilla fija o móvil con tubos de vapor
6	Tubestill Cabin Heater	Calentador tipo cabin de tuberías
7	Fluidised Bed, Multi-hearth Furnace	Lecho fluidizado, horno de hogar múltiple
8	Refinery Cracking Furnace	Horno de craqueo de refinería

Tabla 11

Tipos de hornos industriales, continuación. (Mullinger y Jenkins, 2014)

Nº	Tipo de horno en inglés	Traducción al español
9	Tubestill Heater, Fire Tube Boiler	Calentador tubestill, caldera de tubos de fuego
10	Rotary Kiln, Fluidised Bed, Flash Heating Furnace, Shaft Kiln, Moving or Rotary Hearth	Horno rotatorio, lecho fluidizado, horno de calentamiento rápido
11	Open Hearth Furnace, Glass Tank, Metal Reheating Furnace	Horno de hogar abierto, tanque de vidrio, horno de precalentamiento
12	Refinery Cracking Furnace, Reformer Furnace, Air Heater	Horno de craqueo, horno reformador, calentador de aire
13	Firetube Boiler, Tubestill Heater, Metal Reheating Furnace	Caldera de tubos de fuego, calentador tubestill, horno de precalentamiento metálico
14	Rotary Kiln, Fluidised Bed, Flash Heating Furnace, Shaft Kiln, Moving or Rotary Hearth	Horno rotatorio, lecho fluidizado, horno de calentamiento rápido
15	Open Hearth Furnace, Glass Tank, Metal Reheating Furnace	Horno de hogar abierto, tanque de vidrio, horno de precalentamiento
16	Plasma Furnace	Horno de plasma

Tabla 12

Tipos de hornos industriales, continuación. (Mullinger y Jenkins, 2014).

Nº	Tipo de horno en inglés	Traducción al español
17	Molten Metal Arc Furnace	Horno de arco para metal fundido
18	Metal Melting Arc and Induction Furnaces	Hornos de arco e inducción para fundición de metales
19	Molten Metal Immersion Heaters, Glass Tank Bed Heating	Calentadores por inmersión en metal fundido, calefacción de tanque de vidrio
20	Muffle Furnace	Horno mufla
21	Batch Heater, Annealing Furnace	Calentador por lotes, horno de recocido

Anexo B: Tipos de corrosión

Tabla 13

Principales tipos de corrosión/degradación a altas temperaturas en hornos industriales.

Tipo de degradación	Descripción y mecanismo	Condiciones típicas / Ejemplos
Oxidación	Reacción del metal con oxígeno formando óxidos. Puede ser protectora (Cr_2O_3 en inoxidables) o no protectora (óxidos de hierro en aceros al carbono).	Atmósferas de aire u oxígeno. Ej.: interior de horno de alivio de tensiones en aire.
Sulfidación	Ataque por compuestos de azufre, formando sulfuros no protectores que aceleran la corrosión.	Atmósferas con SO_2 , H_2S . Ej.: gases de combustión con azufre en hornos de incineración.
Ataque por cloruros	Los cloruros volatilizan óxidos protectores formando cloruros metálicos volátiles; deterioran capas de protección.	Presencia de sales o compuestos de cloro. Ej.: residuos de NaCl o HCl de pinturas o entorno marino.

Tabla 14

Principales tipos de corrosión/degradación a altas temperaturas en hornos industriales. Continuación

Tipo de degradación	Descripción y mecanismo	Condiciones típicas / Ejemplos
Carburización	Absorción de carbono formando carburos internos, lo que endurece pero fragiliza.	Atmósferas ricas en carbono: CO, hidrocarburos. Ej.: pirólisis parcial en hornos de incineración.
Nitruración	Formación de nitruros superficiales en presencia de nitrógeno a alta temperatura, endureciendo pero fragilizando.	Atmósferas ricas en nitrógeno, p.ej., por compuestos nitrogenados quemados.
Fragilización microestructural	Degradación de tenacidad por formación de fases frágiles (p.ej., fase sigma en inoxidable) o crecimiento de grano.	Exposición prolongada en el rango 600–800 °C. Ej.: inoxidable austeníticos envejeciendo en hornos.

Anexo C: Materiales refractarios

Tabla 15

Comparativa de materiales metálicos para uso en hornos industriales.

Material metálico	Composición aproximada	Temp. máx. uso continuo (°C)	Resistencia a corrosión en caliente	Ventajas / Desventajas
Acero al carbono	Fe + 0.2% C	~400 °C (prolongado)	Muy baja a >600 °C. Oxidación rápida y scaling.	+ Económico. / – No apto >500 °C; oxidación severa a 650–700 °C.
Acero 2.25Cr-1Mo	Fe + 2.25% Cr, 1% Mo	~540 °C	Mejor que acero al C, pero insuficiente para 700 °C.	+ Algo mejor oxidación que acero al C. / – Vulnerable a sulfuros; limitado <600 °C.
Acero inoxidable 304/304H	18%Cr, 8%Ni (H = alto C)	~800 °C	Buena en aire limpio. Fragilidad sigma a 600–800 °C.	+ Comercial, buena oxidación. / – Sensible a sulfuros, cloruros, sigma.
Acero inoxidable 316/316L	17%Cr, 12%Ni, 2.5%Mo	~800°C	Similar a 304 con mejor resistencia en ambientes agresivos.	+ Mejor resistencia química. / – Fragilidad sigma. Costo mayor que 304.

Tabla 16

Comparativa de materiales metálicos para uso en hornos industriales. Continuación.

Material metálico	Composición aproximada	Temp. máx. uso continuo (°C)	Resistencia a corrosión en caliente	Ventajas / Desventajas
Acero inoxidable 309	23%Cr, 13%Ni	~950 °C	Muy buena en aire; mejor resistencia a NaCl que 304L.	+ Mejor oxidación que inox comunes. / – Más caro, vulnerable a sigma en exposición larga.
Acero inoxidable 310/310S	25%Cr, 20%Ni (S = bajo C)	~1050 °C	Excelente oxidación. Moderada resistencia a sulfuros.	+ Alta resistencia térmica. / – Alto costo, puede fragilizarse en rango 600–800 °C.
Acero inoxidable 314	25%Cr, 20%Ni, 2%Si	~1150°C	Similar a 310 en resistencia a oxidación, incluso mejor en ciclos gracias al Si. Adecuado en atmósferas variables.	+ Máxima resistencia entre inox comerciales. / – Alto costo. Vulnerable a sigma.
Fe-Ni-Cr (Incoloy 800H)	Fe + 32Ni + 21Cr + Ti/Al	~870°C	Excelente resistencia a oxidación, carburización y fluencia «creep».	+ Estabilidad a largo plazo en 700 °C. / – Costo elevado.

Tabla 17

Comparativa de materiales metálicos para uso en hornos industriales. Continuación.

Material metálico	Composición aproximada	Temp. máx. uso continuo (°C)	Resistencia a corrosión en caliente	Ventajas / Desventajas
Ni-Cr (Inconel 600/601)	Ni + 14-17%Cr + Al (601)	~1100 °C	Resistencia sobresaliente a oxidación y cloruros.	+ Alta estabilidad térmica y química. / – Muy caro.
Aceros inoxidables ferríticos (446)	25%Cr, Fe bal.	~1000°C	Buena oxidación en aire.	+ Menor costo que 310. No forma sigma. / – Frágil; soldabilidad pobre.
Aleaciones base Co (Haynes 188)	55%Co, 22%Ni, 22%Cr, W	~900°C	Excelente frente a sulfuros y oxidación.	+ Resistencia superior a sulfidación. / – Muy costosas, uso muy especializado.

Tabla 18

Comparativa de materiales cerámicos refractarios y aislantes usados en hornos industriales.

Material refractario / aislante	Composición / tipo	Temp. servicio típica	Resistencia a corrosión a 700 °C	Ventajas / Desventajas
Ladrillo sílico-aluminoso (arcilla)	40–60 % Al_2O_3 , resto SiO_2	Hasta 1400 °C	Buena en aire limpio; vulnerable a vapores alcalinos y SO_2	+ Económico, fácil de instalar / – Atacado por álcalis, baja resistencia a choques térmicos.
Ladrillo alta alúmina	>70 % Al_2O_3 (mullita, corindón)	Hasta 1600 °C	Mejor resistencia química que arcilla; tolera sulfuros moderados	+ Alta refractariedad y resistencia / – Costo más alto, más frágil a impactos.
Ladrillo de cromita / magnesita	$\text{Cr}_2\text{O}_3\text{Al}_2\text{O}_3$ o MgO	Hasta 1700 °C	Excelente frente a escorias básicas, sulfuros y álcalis	+ Ideal para ambientes agresivos / – Muy costoso, manejo ambiental del cromo.
Ladrillo de zirconia (ZrO_2)	>90 % ZrO_2	Sobre 1800 °C	Prácticamente inmune a ataques químicos a 700 °C	+ Altísima resistencia química y térmica / – Precio extremadamente elevado.
Carburo de silicio (SiC)	SiC sinterizado o recristalizado	Hasta 1500 °C	Buena oxidación hasta 1200 °C, resistente a sulfuros	+ Alta conductividad térmica, excelente resistencia al choque térmico / – Costoso y frágil mecánicamente.

Tabla 19

Comparativa de materiales cerámicos refractarios y aislantes usados en hornos industriales. Continuación.

Material refractario / aislante	Composición / tipo	Temp. servicio típica	Resistencia a corrosión a 700 °C	Ventajas / Desventajas
Hormigón refractario (alto Al_2O_3)	Al_2O_3 50–80 %, $\text{CaO} - \text{Al}_2\text{O}_3$ cementos	Hasta 1500 °C	Similar a ladrillo de alta alúmina; vulnerable a ciclos térmicos intensos	+ Instalación sencilla, formas complejas / – Riesgo de fisuración por retracción térmica.
Fibra cerámica (manta)	Al_2O_3 - SiO_2 fibras ligeras	Hasta 1260 °C (estándar), hasta 1425 °C (alta pureza)	Buena en aire limpio; vulnerable a vapores alcalinos y humedad a alta temperatura	+ Excelente aislamiento, peso ligero / – Degradación química y encogimiento a largo plazo.
Módulos de fibra / vaciados al vacío	Fibras Al_2O_3 - SiO_2 en bloques	Hasta 1600 °C (según composición)	Similar a manta; ligeramente mayor resistencia mecánica	+ Instalación rápida, mejora aislamiento / – También susceptible a ataques químicos prolongados.

Tabla 20

Tratamientos y recubrimientos protectores para materiales a alta temperatura.

Recubrimiento / Tratamiento	Material base objetivo	Mecanismo de protección	Ventajas	Consideraciones / Contras
Aluminizado (difusión o baño)	Aceros al carbono e inoxidables	Forma capa rica en Al que genera Al_2O_3 estable y protectora	+ Mejora notablemente la resistencia a oxidación, sulfidación y carburización	– Requiere tratamiento térmico especial o baño; puede ser costoso y difícil de reparar
Pintura de aluminio (silicónica)	Aceros (estructuras internas y externas)	Deposita Al y Si que se oxidan formando película protectora	+ Económica, fácil de aplicar y retocar	– Durabilidad limitada; polvo de óxido puede desprenderse con el tiempo
Proyección térmica de alúmina	Aleaciones metálicas en zonas críticas	Capa cerámica que aísla el metal del ambiente corrosivo	+ Alta resistencia química y térmica; protege eficazmente	– Fragilidad de la capa cerámica; requiere equipo especializado para aplicación
Esmaltado vítreo	Aceros (paneles, estructuras)	Capa de vidrio que sella e impermeabiliza la superficie	+ Superficie lisa, protege contra oxidación y productos químicos ácidos	– Riesgo de agrietamiento por choques térmicos repetidos

Tabla 21

Continuación: Tratamientos y recubrimientos protectores para materiales a alta temperatura.

Recubrimiento / Tratamiento	Material base objetivo	Mecanismo de protección	Ventajas	Consideraciones / Contras
Galvanizado Zn (exterior)	Acero estructural externo (baja T)	Protección catódica por recubrimiento de zinc	+ Excelente protección contra corrosión ambiental a baja temperatura	– No resiste temperaturas superiores a 420 °C
Shot peening (granallado)	Aceros inoxidables (superficies externas)	Introduce tensiones compresivas que refuerzan la adherencia del óxido	+ Mejora resistencia a grietas y oxidación cíclica	– No evita la corrosión química; efecto limitado si la atmósfera es muy agresiva
Recubrimiento antiescoria refractario	Refractarios (superficies calientes)	Capa sacrificial que absorbe ataques químicos antes de llegar al refractario principal	+ Prolonga la vida útil de los refractarios; fácil de reaplicar	– Debe renovarse periódicamente; desgaste acelerado en zonas de flujo intenso
Impregnación de refractario	Refractarios porosos (fibra, concretos)	Sella poros con silicatos o fosfatos, reduciendo penetración química	+ Mejora resistencia a ataque químico y a abrasión superficial	– Puede rigidizar la fibra, reduciendo su flexibilidad

Anexo D: Resultado del análisis de gases de combustión

Tabla 22

Resultados del análisis de gases en diferentes puntos de la chimenea.

Parámetro	1/3 D - 0°	1/3 D - 90°	2/3 D - 0°	2/3 D - 90°	-1/3 D - 0°	-1/3 D - 90°	-2/3 D - 0°	-2/3 D - 90°	Promedio	Unidad
O ₂	14%	14%	12%	12%	13%	14%	16%	14%	13.5%	%
CO	2209	1420	1358	1164	1282	739	382	182	1092	ppm
EFF	61%	60%	64%	64%	61%	59%	55%	61%	60.7%	%
CO ₂	5%	5%	6%	5%	5%	5%	4%	5%	4.9%	%
Temp. sonda	339	378	394	383	400	391	342	390	377	°C
Temp. amb.	26.20	30.00	31.70	32.00	32.80	33.90	33.80	33.40	31.73	°C
EA	185%	170%	127%	140%	145%	174%	250%	167%	169.6%	%
CO (0)	6764	1401	3274	2964	3343	2160	1489	517	2739	ppm
NO	4.70	5.00	23.50	20.00	25.60	22.60	15.00	21.30	17.21	ppm
NO _x	4.90	5.20	24.70	21.00	26.80	23.80	15.80	22.30	18.06	ppm
SO ₂	35.00	27.00	34.00	25.00	31.00	17.00	11.00	7.00	23.38	ppm
NO (0)	14.00	14.00	57.00	51.00	67.00	66.00	59.00	60.00	48.50	ppm
NO _x (0)	15.00	15.00	60.00	54.00	70.00	69.00	31.00	62.00	47.00	ppm
SO ₂ (0)	109.00	78.00	82.00	63.00	81.00	48.00	42.00	20.00	65.38	ppm
Flow	0.63	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	0.62	lpm

Anexo E: Cálculos

La Tabla 23 muestra los parámetros de diseño suministrados por TECNERO junto con los definidos por el autor del presente trabajo para el diseño del HAT.

Tabla 23

Parámetros operativos del horno durante el proceso de alivio de tensiones.

Descripción	HAT actual	Propuesta ¹	Propuesta ²	Unidad	Ecuación
Masa del cilindro, m	14.22	14.22	14.22	kg	⁸
Capacidad de producción, CÁP	75.0	75.0	75.0	u/h	⁸
Temperatura ambiente, T_a	25.0	25.0	25.0	°C	⁸
Temperatura de proceso, T_p	700.0	700.0	700.0	°C	⁸
Temperatura de gases de combustión, T_g	377.0	350.0	350.0	°C	⁸
Temperatura de la pared externa del horno	160.0	100.0	100.0	°C	⁸
Tiempo de proceso, t_p	18.0	18.0	18.0	min	⁸
Velocidad de proceso, v_p	0.008	0.008	0.008	m/s	⁸
Paso del cilindro, λ	0.400	0.400	0.400	m	⁸
Eficiencia objetivo, η	0.307	0.448	0.448		⁸

Nota:

¹Sin cortina de aire.

²Con cortina de aire.

³Tomado de Munson y cols. (2013)

⁴Tomado de Mullinger y Jenkins (2014)

⁵Tomado de U.S. Standard (1976)

⁶ $0.75 \cdot C_{p_p} + 0.25 \cdot C_{p_b}$

⁷ Del diseño CAD

⁸ Parámetro de diseño

Tabla 24

Dimensionamiento del horno.

Descripción	HAT actual	Propuesta ¹	Propuesta ²	Unidad	Ecuación
Longitud efectiva del HAT, L	9.0	9.0	9.0	m	(26)
Tasa de producción, $\dot{m}$	0.296	0.296	0.296	kg/s	(27)

Nota:

¹Sin cortina de aire.

²Con cortina de aire.

Tabla 25

Balance energético del horno durante el proceso de alivio de tensiones.

Descripción	HAT actual	Propuesta ¹	Propuesta ²	Unidad	Ecuación
Calor específico del acero	486.0	486.0	486.0	J/kg°K	³
Potencia aprovechada, Q_{pi}	97,184.8	97,184.8	97,184.8	W	(31)
Potencia total, $\dot{Q}_t$	316,562.9	216,930.4	216,930.4	W	(30)
Tasa de convección natural, k	20.0	20.0	20.0	W/m ² °K	⁴
Superficie externa del horno, S	38.4	38.4	38.4	m ²	⁷
Pérdidas por convección, $\dot{Q}_{pp}$	103,788.0	57,660.0	57,660.0	W	(32)
Pérdidas por convección, $\dot{Q}_{pp}$	2,700	1,500	1,500	W/m ²	(32)
Emisividad	0.9	0.9	0.9	-	³
Coef. Stefan - Boltzmann	5.67E-08	5.67E-08	5.67E-08	W/m ² °K ⁴	³

Nota:

¹Sin cortina de aire.

²Con cortina de aire.

³Tomado de Munson y cols. (2013)

⁴Tomado de Mullinger y Jenkins (2014)

⁵Tomado de U.S. Standard (1976)

⁶ $0.75 \cdot C_{p_p} + 0.25 \cdot C_{p_b}$

⁷ Del diseño CAD

Tabla 26

Balance energético del horno durante el proceso de alivio de tensiones. Continuación.

Descripción	HAT actual	Propuesta ¹	Propuesta ²	Unidad	Ecuación
Área aperturas	0.90	0.80	0.80	m ²	⁷
Pérdidas por radiación, Q_{ab}	11,026.5	9,801.3	9,801.3	W	(33)
Poder calorífico del GLP, PCI_{GLP}	46.0	46.0	46.0	MJ/kg	(36)
Consumo de combustible, W	0.0069	0.0047	0.0047	kg/s	(35)
Consumo de combustible, W	24.8	17.0	17.0	kg/h	(35)
Consumo de aire estequiométrico	15.55	15.55	15.55	kg/kg	4.3.2

Nota:

¹Sin cortina de aire.

²Con cortina de aire.

³Tomado de Munson y cols. (2013)

⁴Tomado de Mullinger y Jenkins (2014)

⁵Tomado de U.S. Standard (1976)

⁶ $0.75 \cdot Cp_p + 0.25 \cdot Cp_b$

⁷ Del diseño CAD

Tabla 27

Cálculo de la chimenea

Descripción	HAT actual	Propuesta ¹	Propuesta ²	Unidad	Ecuación
Presión a nivel del mar, P_0	101,325	101,325	101,325	Pa	⁵
Altura, z	2,400	2,400	2,400	m	
Gradiente térmico atmosférico, Γ	6.5E-03	6.5E-03	6.5E-03	K/m	⁵
Temperatura a nivel del mar, T_0	25.00	25.00	25.00	K	⁵
Masa molar del aire, M	0.0290	0.0290	0.0290	kg/mol	⁵
Constante universal de gases, R_u	8.314	8.314	8.314	J/mol·K	⁵
Presión atmosférica, $P(z)$	84,123	84,123	84,123	Pa	(45)
Densidad del aire ambiente, ρ_a	0.984	0.984	0.984	kg/m ³	(46)
Const. específica de aire seco, R_s	287.00	287.00	287.00	J/kg·K	⁵
Temperatura ambiente, T_a	298.00	298.00	298.00	K	
Volumen específico del GLP, ν_g	1.350	1.294	1.294	m ³ /kg	(39)
Masa molar del GLP, M_g	0.048	0.048	0.048	kg/mol	4.3.2
Temp. de gases de comb., T_g	650	623	623	K	⁵
Presión de los gases, P_g	84,123.36	84,123.36	84,123.36	Pa	P(z)
Constante del gas, R_g	174.67	174.67	174.67	J/kg·K	(40)
Caudal volumétrico, $\dot{V}_g$	0.154	0.101	0.101	m ³ /s	(42)
Flujo másico de gases., $\dot{m}_g$	0.114	0.078	0.078	kg/s	(37)

Nota:

¹Sin cortina de aire.

²Con cortina de aire.

³Tomado de Munson y cols. (2013)

⁴Tomado de Mullinger y Jenkins (2014)

⁵Tomado de U.S. Standard (1976)

⁶ $0.75 \cdot C_{p_p} + 0.25 \cdot C_{p_b}$

⁷ Del diseño CAD

⁸ Parámetro de diseño

Tabla 28

Cálculo de la chimenea. Continuación.

Descripción	HAT actual	Propuesta ¹	Propuesta ²	Unidad	Ecuación
Velocidad de los gases, v_g	4.00	10.00	10.00	m/s	Tabla 6
Diametro de chimenea	0.22	0.11	0.11	m	(43)
Dif. de presión por tiro, ΔP_t	20.00	25.00	26.00	Pa	Tabla 6
Aceleración de la gravedad g	9.81	9.81	9.81	m/s ²	⁵
Altura de la chimenea, H	8.4	12.1	12.6	m	(44)
Temp. de gases de comb., T_g	650	623	623	K	⁵
Presión de los gases, P_g	84,123.36	84,123.36	84,123.36	Pa	P(z)
Constante del gas, R_g	174.67	174.67	174.67	J/kg·K	(40)
Caudal volumétrico, $\dot{V}_g$	0.154	0.101	0.101	m ³ /s	(42)
Flujo másico de gases., $\dot{m}_g$	0.114	0.078	0.078	kg/s	(37)
Velocidad de los gases, v_g	4.00	10.00	10.00	m/s	Tabla 6
Diametro de chimenea	0.22	0.11	0.11	m	(43)
Dif. de presión por tiro, ΔP_t	20.00	25.00	26.00	Pa	Tabla 6
Aceleración de la gravedad g	9.81	9.81	9.81	m/s ²	⁵
Altura de la chimenea, H	8.4	12.1	12.6	m	(44)

Nota:

¹Sin cortina de aire.

²Con cortina de aire.

³Tomado de Munson y cols. (2013)

⁴Tomado de Mullinger y Jenkins (2014)

⁵Tomado de U.S. Standard (1976)

⁶ $0.75 \cdot C_{p_p} + 0.25 \cdot C_{p_b}$

⁷ Del diseño CAD

⁸ Parámetro de diseño

Tabla 29

Cálculo de la cortina de aire.

Descripción	HAT actual	Propuesta ¹	Propuesta ²	Unidad	Ecuación
Área de ingreso/salida de carga	0.004	0.004	0.004	m ²	
Velocidad de la cortina	0.0	0.0	15.0	m/s	
Temperatura de salida	377.0	350.0	360.0	°C	
Gases de combustión extraído	0	0	80	%	
Calor específico	1,100	1,100	1,100	W/kg°K	⁵
Caudal del aire	0.000	0.000	0.066	m ³ /s	(47)
Potencia para calentar el aire	0.000	0.000	0.129	kg/s	³
Déficit de flujo de recirculación	0	0	24,544	W	(38)
Eficiencia estimada, η	0.306	0.446	0.399	-	(30)

Nota:

¹Sin cortina de aire.

²Con cortina de aire.

³Tomado de Munson y cols. (2013)

⁴Tomado de Mullinger y Jenkins (2014)

⁵Tomado de U.S. Standard (1976)

⁶ $0.75 \cdot C_{p_p} + 0.25 \cdot C_{p_b}$

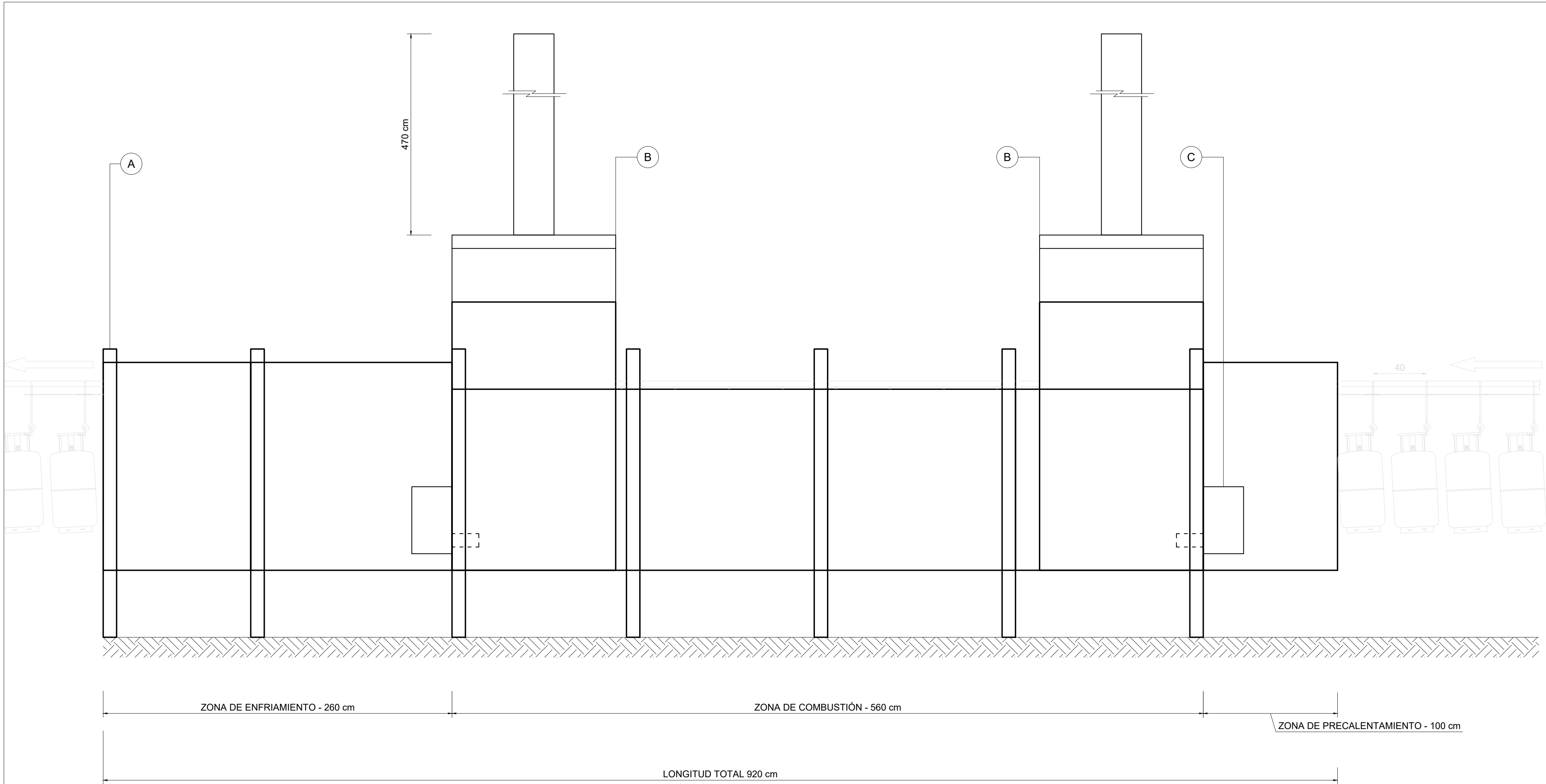
⁷ Del diseño CAD

⁸ Parámetro de diseño

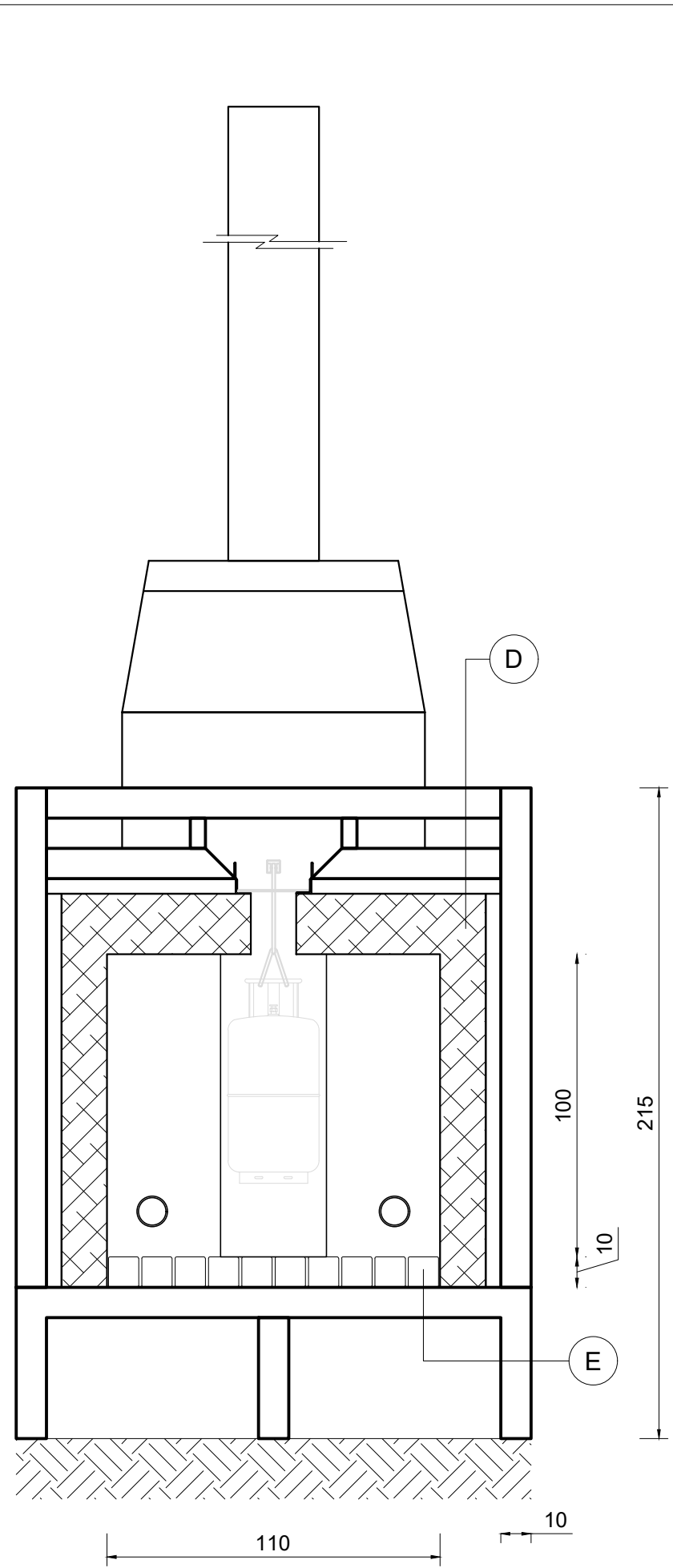
Anexo F: Planos

A continuación se presentan los planos correspondientes al horno de alivio de tensiones, organizados para mostrar de manera progresiva la evolución del diseño. El Plano 1/3 documenta el estado inicial del horno, sirviendo como línea base para el análisis comparativo. El Plano 2/3 expone la propuesta de mejora a nivel de conjunto, integrando las modificaciones estructurales y funcionales derivadas del proceso de diseño. Finalmente, el Plano 3/3 detalla el despiece, las dimensiones y los materiales de cada componente, constituyendo la información necesaria para su fabricación y ensamblaje.

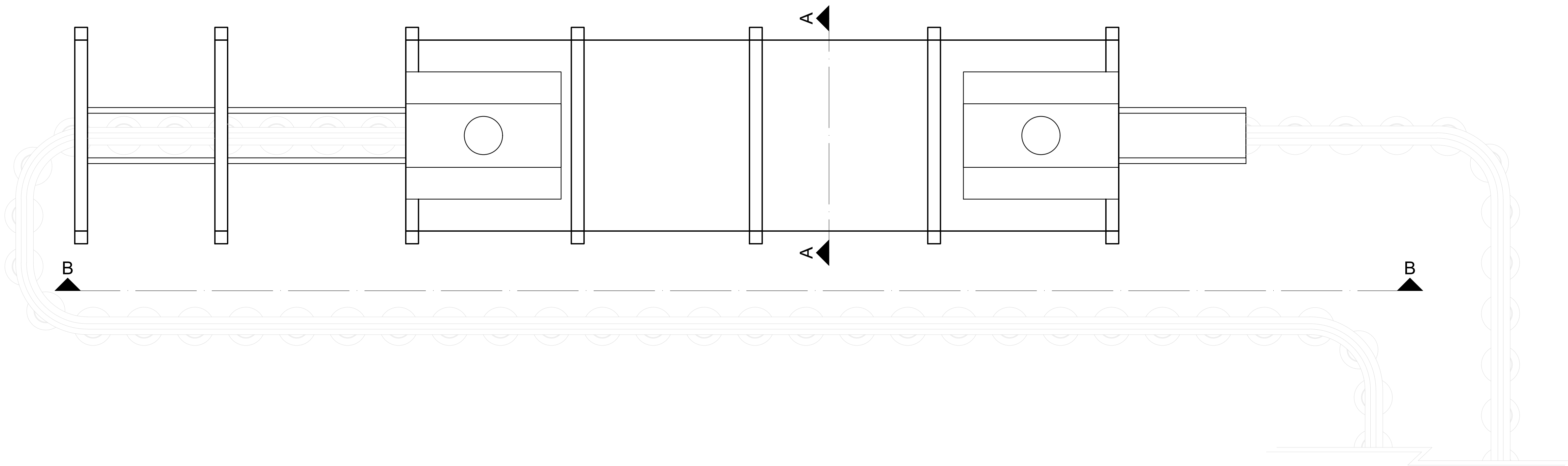
- **Plano 1/3:** Horno de alivio de tensiones, estado inicial.
- **Plano 2/3:** Propuesta de mejora para el horno de alivio de tensiones, conjunto.
- **Plano 3/3:** Propuesta de mejora para el horno de alivio de tensiones, despiece.



VISTA LATERAL
B-B



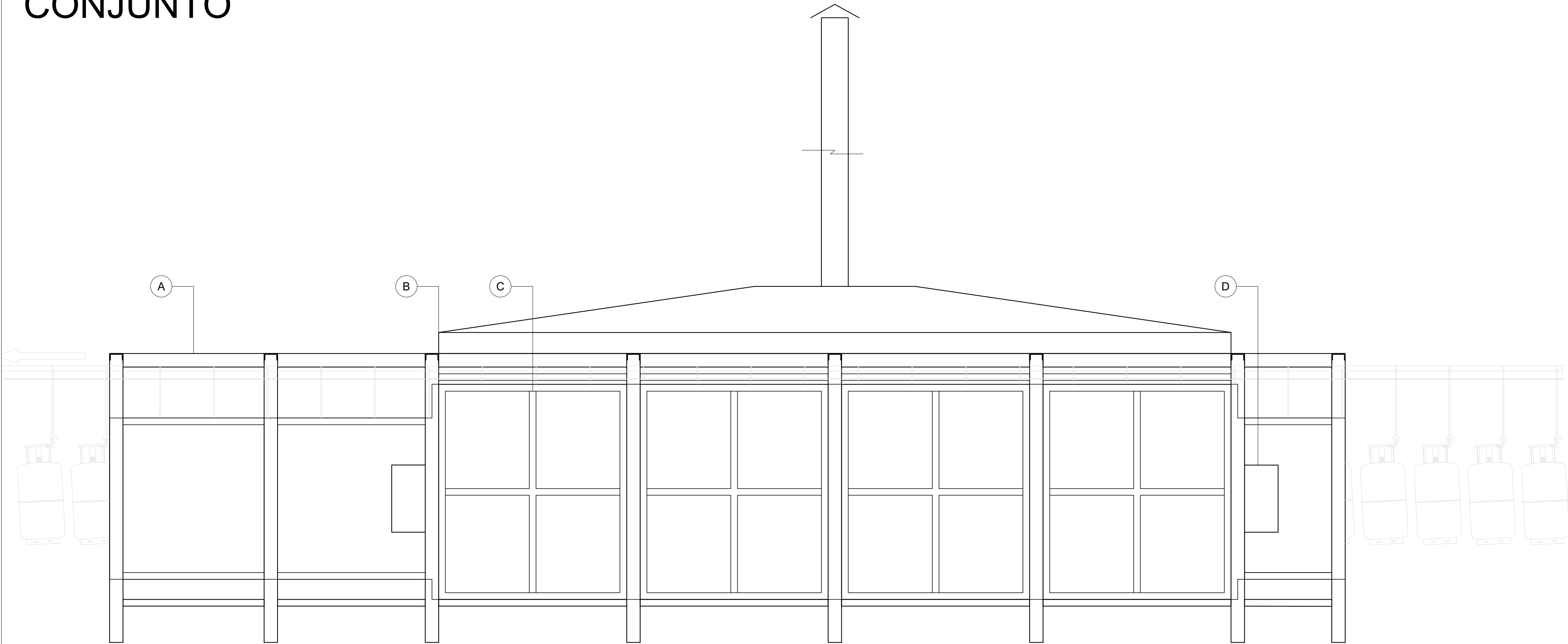
SECCIÓN A-A



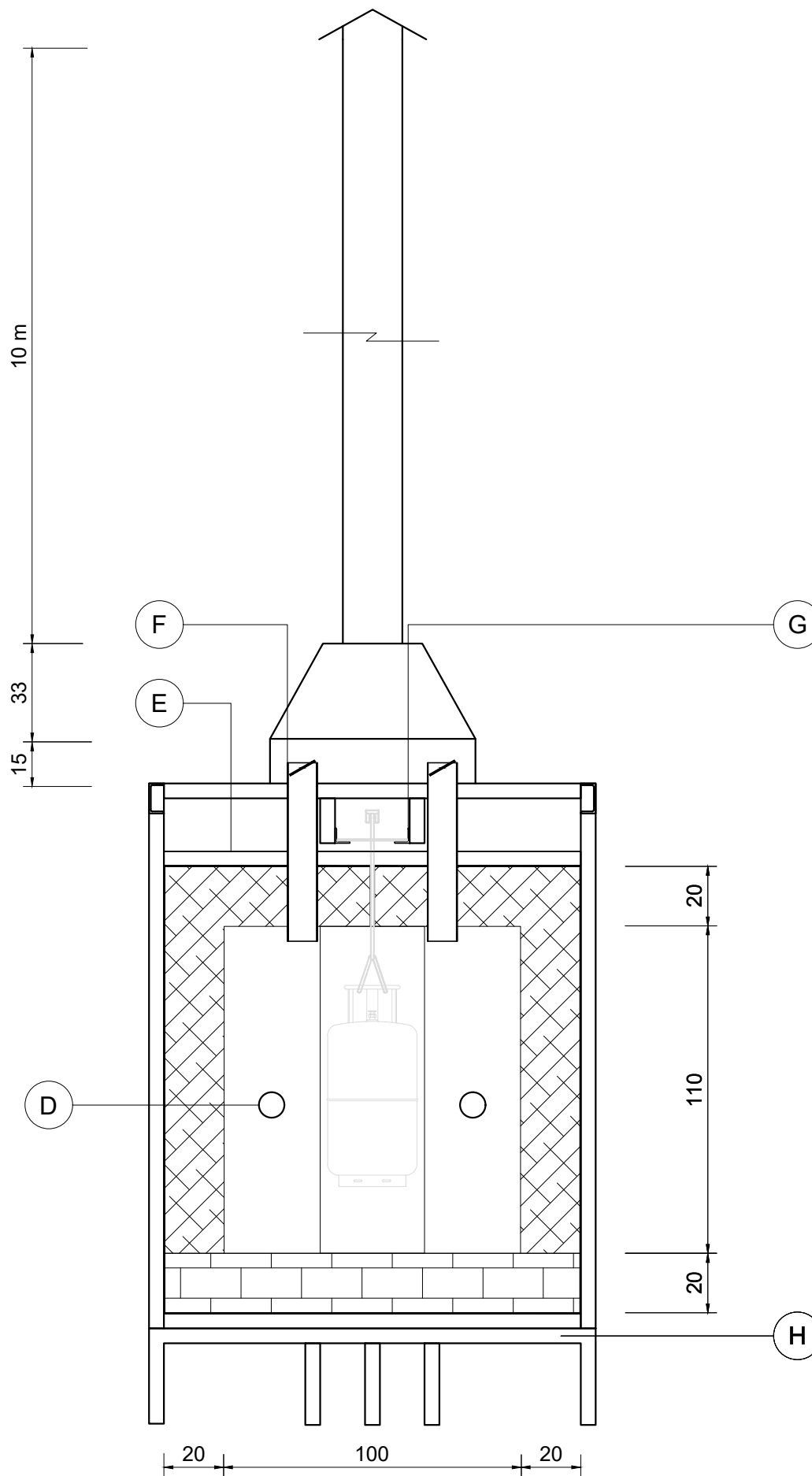
VISTA EN PLANTA

E	~5.0 m2	Ladrillo	-	-	-
D	~6.0 m3	Revestimiento interior - manta cerámica	-	-	-
C	4	Quemador Baltur STDH - 99 kW	ASTM	-	-
B	1	Cilindros	ASTM	304	2B
A	1	Estructura	ASTM	A36	Pintura
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Terminado
Fecha		Nombre	Firma: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA		
Dibujado	21-11-2025	ING. WILSON BUSTAMANTE			
Comprobado	21-11-2025	ING. JOHN CALLE, Ph.D.			
Aprobado	21-11-2025	ING. JOHN CALLE, Ph.D.			
Escala:		Lámina No.			
1:20		HORNO PARA ALIVIO DE TENSIONES ALIVIO DE TENSIONES - TECNICO			1/3

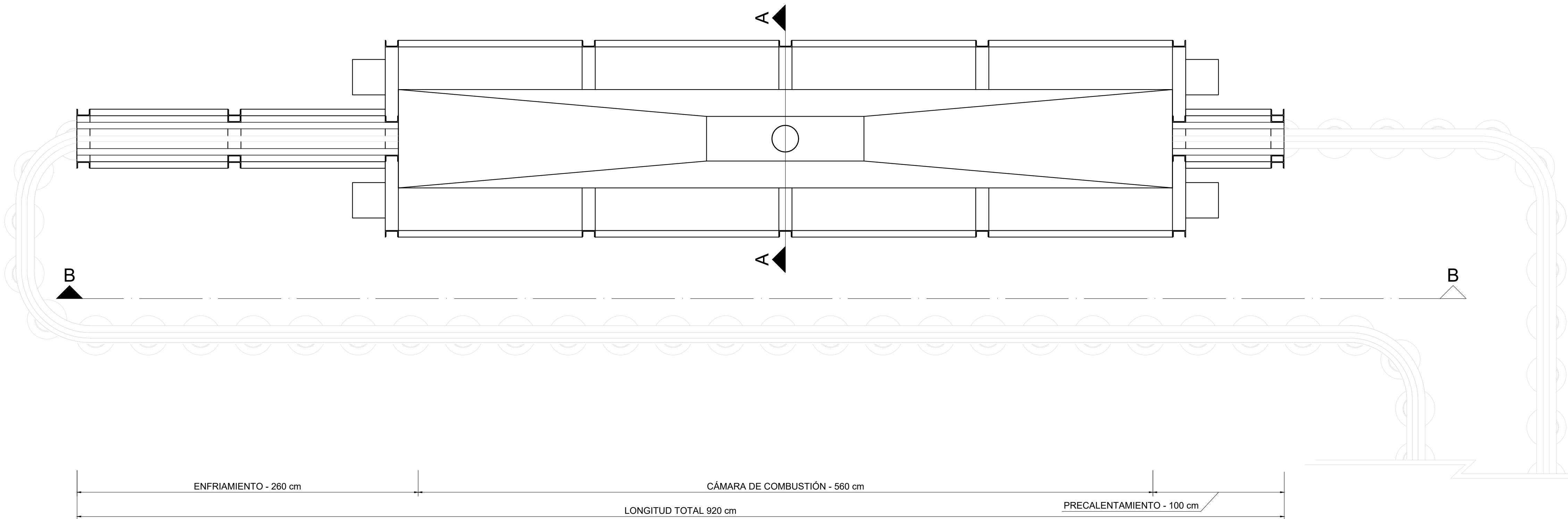
CONJUNTO



HAT - VISTA LATERAL
B-B



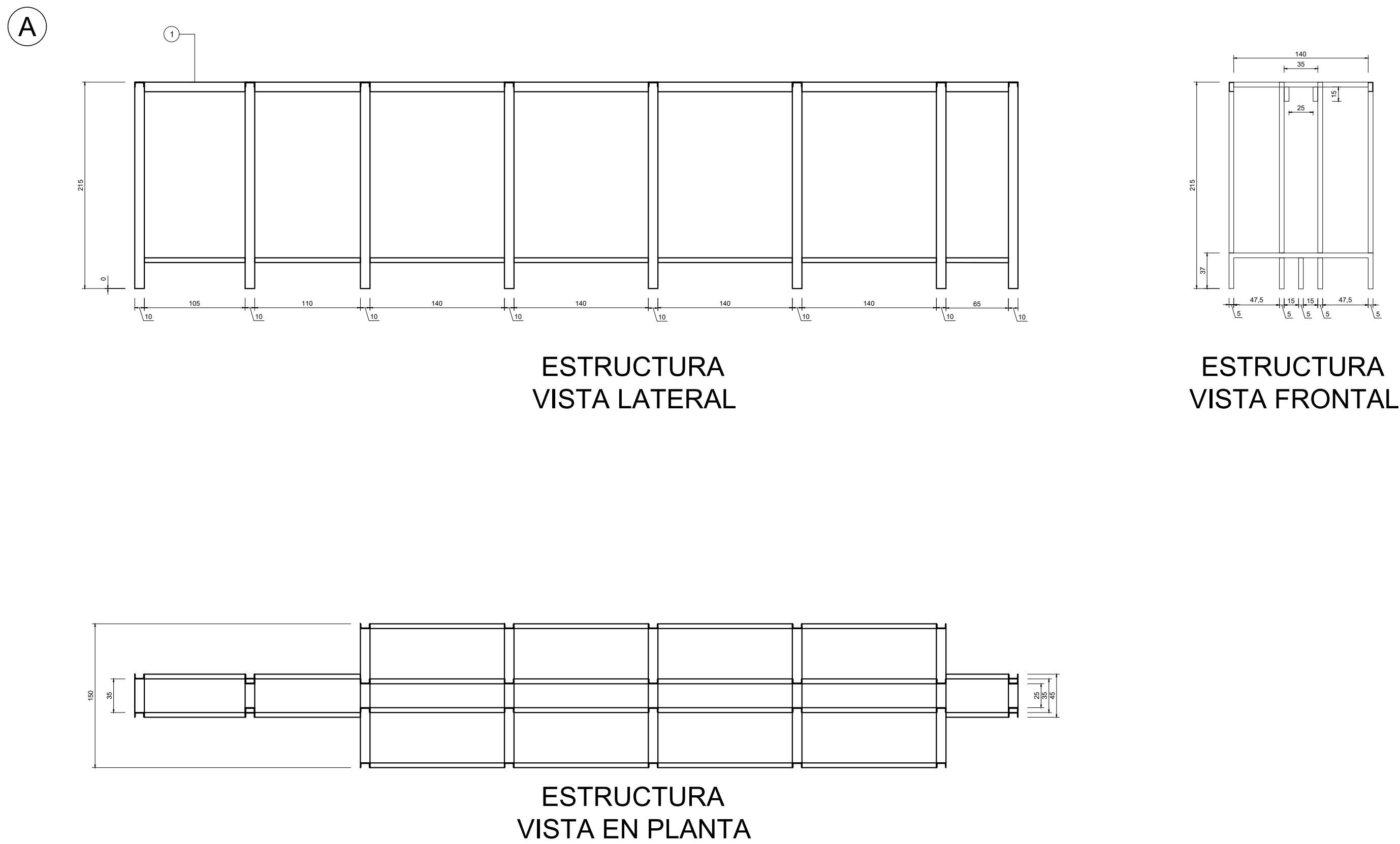
HAT - VISTA FRONTAL
A-A



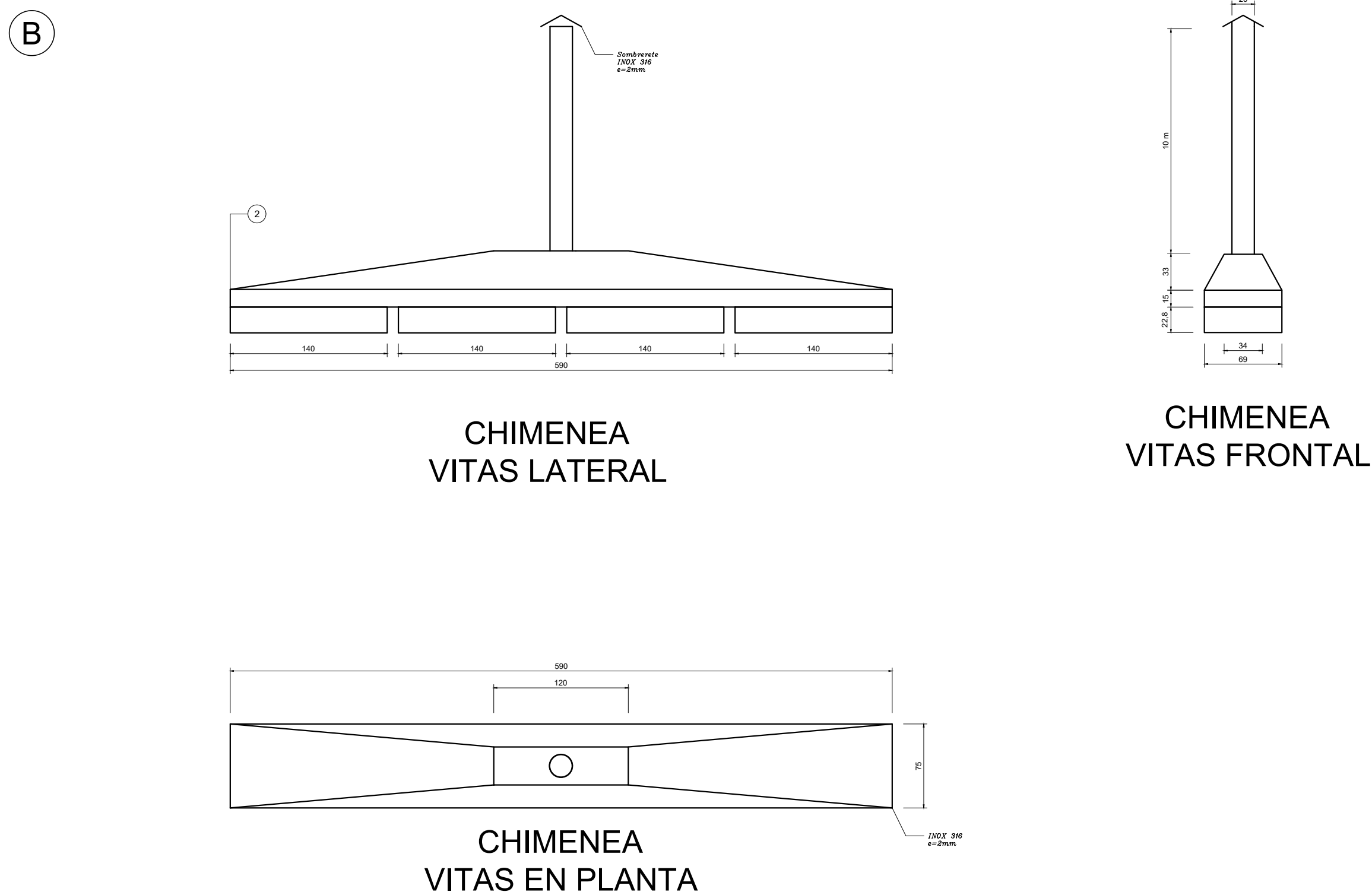
HAT - VISTA EN PLANTA

H	4	Pinel aislante inferior	ASTM	-	-
G	2	Ángulo grueso para codena	ASTM	INOX 316	2B
F	6	Ducto de escape	ASTM	INOX 316	2B
E	8	Pinel aislante superior	ASTM	INOX 316	2B
D	4	Quemador Bultor BTG12 - 89 kW	-	-	-
C	8	Pinel aislante lateral	ASTM	-	-
B	1	Chimenea	ASTM	INOX 316	2B
A	1	Estructura	ASTM	A36	Plataforma de alta temp
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Terminado
		Fecha	Nombre	Firma: UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA	
Dibujado		21-11-2025	ING. WILSON BUSTAMANTE		
Comprobado		21-11-2025	ING. JOHN CALLE, Ph.D.		
Aprobado		21-11-2025	ING. JOHN CALLE, Ph.D.		
Escala:					Lámina No.
1:20		PROPUESTA DE MEJORA PARA EL HORNO DE ALIVIO DE TENSIONES - TECNICO CONJUNTO			2/3

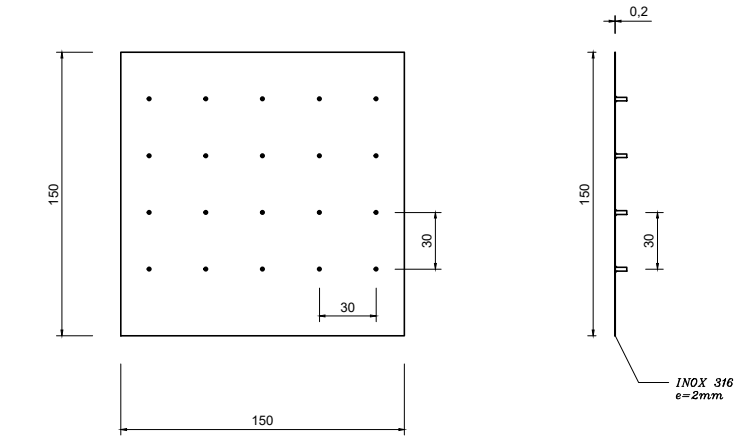
ESTRUCURA



CHIMENEA

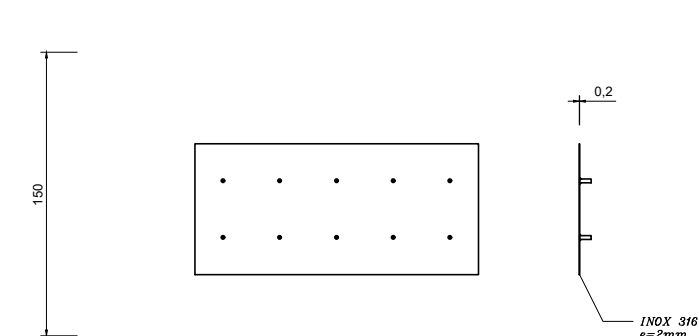


7



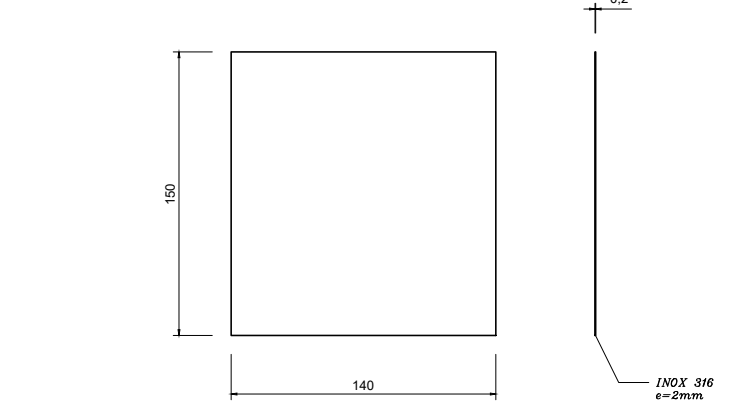
PANEL BASE LATERAL

8



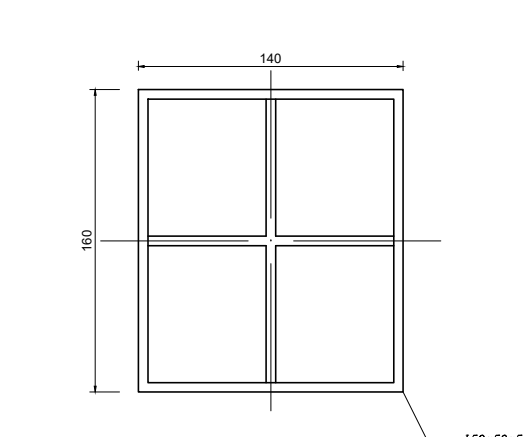
PANEL BASE SUPERIOR

12



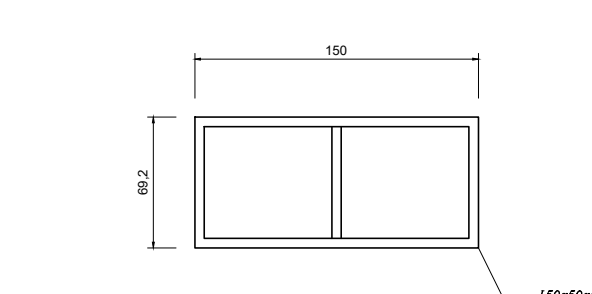
PANEL BASE INFERIOR

4



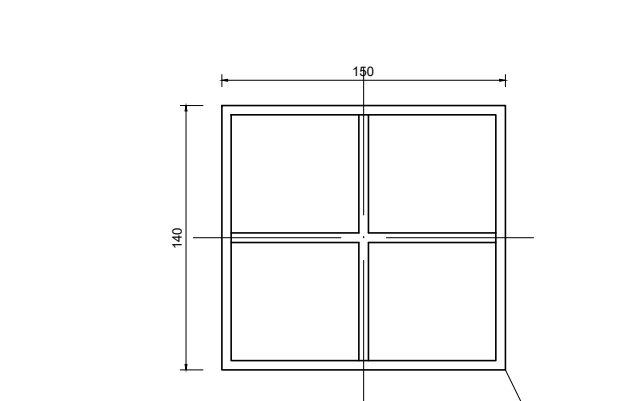
MARCO BASE LATERAL

9



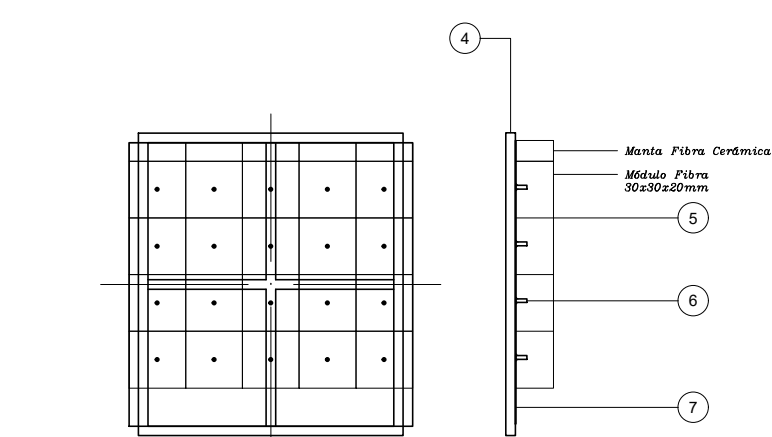
MARCO BASE SUPERIOR

10



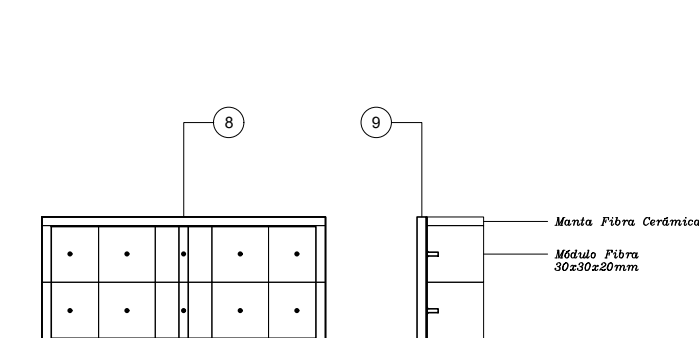
MARCO BASE INFERIOR

C



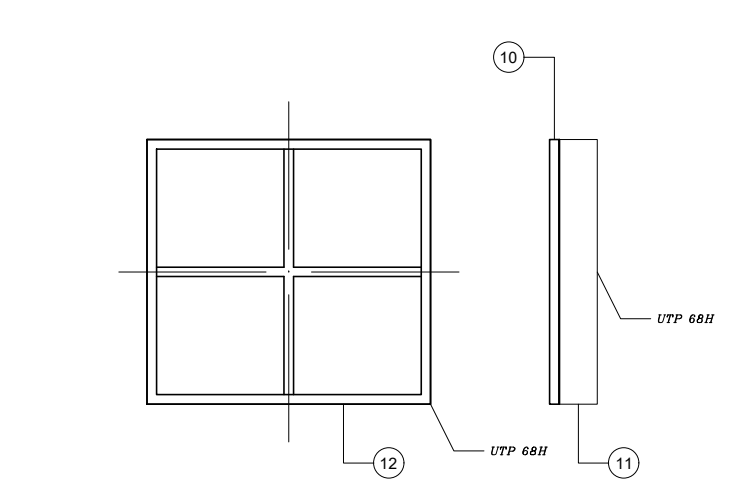
PANEL AISLANTE LATERAL

E

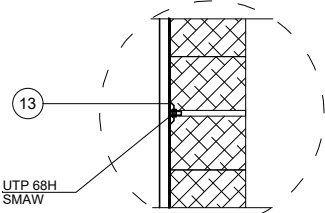


PANEL AISLANTE SUPERIOR

H

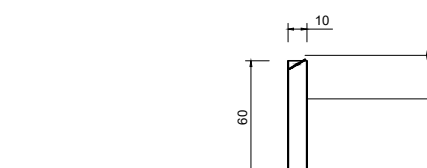


PANEL AISLANTE IFERIOR



DETALLE DE FIJACIÓN DE MÓDULOS

F



DUCTO DE ESCAPE

15	1.7 m3	Ducto de escape	ASTM	INOX 316	2B
14	1.7 m3	Compuerta de regulación	ASTM	INOX 316	2B
13	4	Brachet de sujeción	CCW00L	INOX 316	2B
12	4	Panel base inferior	ASTM	INOX 316	2B
11	1.7 m3	Ladrillo refractario de alta alúmina	-	-	-
10	4	Marco base inferior	-	-	Pintura de alta temp.
9	4	Marco base superior	ASTM	INOX 316	Pintura de alta temp.
8	8	Panel base superior	ASTM	INOX 316	2B
7	8	Panel base lateral	ASTM	INOX 316	-
6	240	Tornillo INOX M10x30	ASTM	INOX 316	-
5	6.5 m3	Fibra cerámica 950°C, densidad: 220 kg/m3	CCW00L	Fibra Cerámica	-
4	8	Marco base lateral	ASTM	A36	Pintura de alta temp.
3	8	Ducto de escape - Tubo 600 ± 100 ± 3 mm	ASTM	INOX 316	2B
2	280 kg	Plancha Inox. ±2 mm.	ASTM	316	2B
1	707 kg	UPN 100x50x6	EN 10279	A36	Pintura de alta temp.
H	2	Panel aislante inferior	ASTM	-	-
G	2	Ángulo guía para cadena	ASTM	INOX 316	2B
F	6	Ducto de escape	ASTM	INOX316	2B
E	8	Panel aislante superior	ASTM	INOX316	2B
D	4	Quemador Biotur BT012 - 99 kW	-	-	-
C	8	Panel aislante lateral	ASTM	-	-
B	1	Chimeneas	ASTM	INOX 316	2B
A	1	Estructura	ASTM	A36	Pintura de alta temp.
Pos.	Cant.	Denominación	Norma	Material	Terminado

	Fecha	Nombre	Firma:	UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA
Dibujado	21-11-2025	INC. WILSON BUSTAMANTE		
Comprobado	21-11-2025	INC. JOHN CALLE, Ph.D.		
Aprobado	21-11-2025	INC. JOHN CALLE, Ph.D.		
1:40	PROPUESTA DE MEJORA PARA EL HORNO DE ALIVIO DE TENSIONES - TECNICO DESPIECE			Lámina No. 3/3

Anexo G: Presupuesto

Tabla 30

Mano de obra estimada para la construcción de la propuesta

Rubro	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Costo
Mano de obra – Soldador calificado	40.0	h	\$ 4.75	\$ 190.00
Mano de obra – Ayudante mecánico	160.0	h	\$ 4.23	\$ 676.80
Mano de obra - Técnico electromecánico	160.0	h	\$ 4.28	\$ 684.80
Mano de obra - Ingeniero electromecánico	40.0	h	\$ 4.77	\$ 190.80
Total mano de obra				\$ 1,742.40

Tabla 31

Equipos, materiales y consumibles requeridos para la construcción de la propuesta

Rubro	Cantidad	Unidad	Precio unitario	Costo
Acero estructural A36	1,240.573	kg	\$ 1.500	\$ 1,860.86
Acero inoxidable 316	962.100	kg	\$ 20.00	\$ 19,242.01
Pernos y herrajes en 316	650	und.	\$ 4.50	\$ 2,925.00
Suelda WLD-316L-F4	96.2	m	\$ 5.50	\$ 529.165
Suelda E6013x 4.0 mm	620.3	m	\$ 1.20	\$ 744.34
Manta térmica + accesorios	6.5	m3	\$ 599.00	\$ 3,893.50
Quemadores (BTG12) + accesorios	4.0	und.	\$ 1,811.00	\$ 7,244.00
Ventilador - 139 CFM 0.5"	2.0	und.	\$ 850.00	\$ 1,700.000
Sistema de control	1.00	und.	\$ 2,500.00	\$ 2,500.00
Boquillas de aire	2.00	und.	\$ 650.00	\$ 1,300.00
Pintura de alta temperatura	620.3	m ²	\$ 5.50	\$ 3,411.58
Total equipos, materiales y consumibles				\$ 45,350.44

Tabla 32

Presupuesto para la construcción de la propuesta

Rubro	Cantidad	Costo
Mano de obra	1	\$ 1,742.40
Equipos y materiales	1	\$45,350.44
Instalación y puesta en marcha	1	\$ 2,354.64
Materiales e imprevistos	1	\$ 941.86
Total sin IVA		\$ 50,389.34

PROPUESTA DE MEJORA PARA EL FUNCIONAMIENTO DE UN HORNO DE ALIVIO DE TENSIONES DE LA EMPRESA TECNERO

AUTOR:

WILSON GUILLERMO BUSTAMANTE DE LOS RÍOS