



**UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**  
**SEDE CUENCA**  
**CARRERA DE MECATRÓNICA**

DISEÑO DE UN HORNO DE PRECALENTAMIENTO DE BRONCE  
PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPARTALLAMAS EN LA EMPRESA  
REMIBRASS S.A.

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

AUTOR: LUIS DAVID LUPERCIO PIEDRA

TUTOR: ING. DIEGO URGILÉS CONTRERAS, MSC.

Cuenca – Ecuador

2025

# CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Luis David Lupercio Piedra con documento de identificación N° 0107080178 manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Cuenca, 29 de julio del 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink that reads "David Lupercio P." with a horizontal line underneath.

Luis David Lupercio Piedra  
0107080178

# **CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Luis David Lupercio Piedra con documento de identificación N° 0107080178, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedo a la Universidad Politécnica Salesiana la titularidad sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: "Diseño de un horno de precalentamiento de bronce para la producción de espartallamas en la empresa Remibrass S.A.", el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero en Mecatrónica, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con lo manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 29 de julio del 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink that reads "David Lupercio P." with a horizontal line underneath.

Luis David Lupercio Piedra  
0107080178

# CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Diego René Urgilés Contreras con documento de identificación N° 0104431374, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: DISEÑO DE UN HORNO DE PRECALENTAMIENTO DE BRONCE PARA LA PRODUCCIÓN DE ESPARTALLAMAS EN LA EMPRESA REMIBRASS S.A., realizado por Luis David Lupercio Piedra con documento de identificación N° 0107080178, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Cuenca, 29 de julio del 2025

Atentamente,

A handwritten signature in blue ink, appearing to read 'Diego Urgiles Contreras', with a horizontal line underneath.

Ing. Diego René Urgiles Contreras, MsC.

0104431374

## Dedicatoria

A Dios y a la Virgen María Auxiliadora, por ser mi guía constante y darme fuerza en cada paso de este camino.

A mis padres, por su amor incondicional, por cuidarme, impulsarme y estar siempre pendientes de mí. Nada de esto sería posible sin ustedes. A mis hermanos, y en especial a mi hermano Javi, por ser mi compañero de ruta desde siempre y por estar junto a mí en cada etapa, como solo un verdadero hermano sabe estar. A toda mi familia, por su cariño, sus palabras sabias y por estar presentes de tantas formas a lo largo de este proceso.

Y a esa amistad especial, Belén, que estuvo a mi lado durante toda esta etapa, por compartir tantas sonrisas, silencios, palabras de aliento y momentos que hicieron más llevadero este recorrido.

## Agradecimientos

Mediante este trabajo culmino una de las etapas más importantes de mi vida, llena de aprendizajes, logros, aventuras y desafíos que me han hecho crecer tanto académica como personalmente. Cada uno de estos peldaños no habría sido posible sin el apoyo de quienes han estado a mi lado.

Agradezco primeramente a Dios y a la Virgencita María Auxiliadora, porque de su mano he llegado hasta aquí y he podido alcanzar esta meta.

A mis padres y hermanos, que han sido mi motivación constante para seguir adelante, prepararme y enfrentar cada reto. A toda mi familia, desde primos hasta abuelitos, por su cariño entrañable y por enseñarme con el ejemplo el valor de la dedicación, la fe y la unión.

A Belén, que ha estado a mi lado con su apoyo incondicional, siendo un pilar fundamental en los momentos más difíciles y alegres de este camino.

Quiero agradecer también a todos los docentes que aportaron a mi formación académica, en particular al Ing. Diego Urgiles, por su guía y acompañamiento en el desarrollo de este trabajo de titulación. Además, valoro profundamente a todas las personas con quienes compartí fuera de las aulas y que hicieron de esta etapa una experiencia mucho más completa y significativa.

Finalmente, agradezco a la empresa Remibrass S.A. por la oportunidad brindada para realizar este trabajo, y reconozco especialmente a Edgar y Pachi, quienes me brindaron su apoyo durante todo este proceso, que representa el cierre de una etapa fundamental en mi formación profesional.

Este documento fue realizado enteramente en L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X

# Índice

Certificado de responsabilidad y autoría del trabajo de titulación	I
Certificado de cesión de derechos de autor del trabajo de titulación a la Universidad Politécnica Salesiana	II
Certificado de dirección del trabajo de titulación	III
Dedicatoria	IV
Agradecimientos	V
Resumen	XIII
Abstract	XIV
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>
<b>2. Problema</b>	<b>2</b>
2.1. Descripción del problema . . . . .	2
2.2. Antecedentes . . . . .	2
2.3. Importancia y alcances . . . . .	3
2.4. Delimitación . . . . .	4
2.4.1. Espacial o geográfica . . . . .	4
2.4.2. Temporal . . . . .	5
2.4.3. Sectorial o institucional . . . . .	5
<b>3. Objetivos</b>	<b>6</b>
3.1. Objetivo general . . . . .	6
3.2. Objetivos Específicos . . . . .	6
<b>4. Marco Teórico</b>	<b>6</b>
4.1. Contexto de la empresa Remibrass S.A. . . . .	6
4.2. Influencia de la Temperatura en la Deformación Volumétrica y el Forjado en Caliente . . . . .	7
4.3. Diseño de sistemas de calentamiento . . . . .	9

4.3.1. Conducción . . . . .	9
4.3.2. Convección . . . . .	10
4.3.3. Radiación . . . . .	10
4.4. Sistemas de control en hornos industriales . . . . .	10
4.5. Tecnologías y soluciones en la industria . . . . .	11
<b>5. Marco metodológico</b>	<b>12</b>
5.1. Análisis de las condiciones actuales de operación del horno, parámetros estructurales, térmicos y operativos que determinan su desempeño. . . . .	13
5.1.1. Identificación de la necesidad . . . . .	13
5.1.2. Investigación preliminar . . . . .	14
5.1.3. Planteamiento de objetivo . . . . .	36
5.1.4. Especificaciones de desempeño . . . . .	37
5.2. Diseño de la estructura mecánica y el sistema de generación de calor para el horno de precalentamiento de bronce. . . . .	37
5.2.1. Ideación e invención . . . . .	38
5.2.2. Análisis . . . . .	44
5.2.3. Selección . . . . .	51
5.2.4. Diseño detallado - parte mecánica . . . . .	53
5.3. Diseño de un sistema de control para monitorear la temperatura durante el proceso de precalentamiento de bronce. . . . .	61
5.3.1. Diseño detallado - parte de control . . . . .	61
5.4. Elaboración de la propuesta presupuestaria para la implementación del horno desarrollado. . . . .	76
5.4.1. Creación de prototipos y pruebas . . . . .	77
5.5. Producción . . . . .	81
<b>6. Resultados</b>	<b>81</b>
6.1. Análisis de las condiciones actuales de operación del horno, parámetros estructurales, térmicos y operativos que determinan su desempeño. . . . .	81
6.2. Diseño de la estructura mecánica y el sistema de generación de calor para el horno de precalentamiento de bronce. . . . .	83
6.3. Diseño de un sistema de control para monitorear la temperatura durante el proceso de precalentamiento de bronce. . . . .	88

6.4. Elaboración de la propuesta presupuestaria para la implementación del horno desarrollado. . . . .	91
<b>7. Cronograma</b>	<b>91</b>
<b>8. Presupuesto</b>	<b>93</b>
8.1. Talento humano . . . . .	93
8.2. Recursos materiales . . . . .	93
<b>9. Conclusiones</b>	<b>94</b>
<b>10. Recomendaciones</b>	<b>95</b>
<b>Referencias</b>	<b>101</b>
<b>ANEXOS</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 1: Hornos en Remibrass.</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 2: Resultado de la etapa de troquelado.</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 3: Torchos de Bronce.</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 4: Tamaños de espartallamas.</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 5: Características del Ladrillo Refractario Recto Maxial</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 6: Características del Mortero SUPERAEROFRAX</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 7: Dimensiones del horno #2 - Remibrass S.A.</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 8: Características de la Manta Refractaria</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 9: Dimensiones del horno propuesto</b>	<b>102</b>
<b>Anexo 10: Propuesta Presupuestaria</b>	<b>102</b>

## Lista de Tablas

1.	Tiempos de carga de material . . . . .	16
2.	Resumen de parámetros operativos - Torchos medianos . . . . .	18
3.	Resumen de parámetros operativos - Torchos grandes . . . . .	18
4.	Resumen de parámetros operativos - Torchos jumbo . . . . .	19
5.	Comparativo de hornos de precalentamiento . . . . .	20
6.	Características principales del ladrillo refractario Recto Maxial 210 M . . . . .	22
7.	Características principales del mortero refractario . . . . .	23
8.	Resumen de mediciones térmicas del horno artesanal . . . . .	25
9.	Distribución térmica por superficie del horno actual . . . . .	32
10.	Resumen de parámetros para cálculo de $h$ . . . . .	33
11.	Distribución de pérdidas de calor . . . . .	34
12.	Características del Diseño 1: Horno restaurado . . . . .	39
13.	Características del Diseño 2: Primer modelo de horno a GLP . . . . .	40
14.	Características del Diseño 3: Segundo modelo de horno a GLP . . . . .	41
15.	Características del Diseño 4: Primer modelo de horno eléctrico . . . . .	42
16.	Características del Diseño 5: Segundo modelo de horno eléctrico . . . . .	43
17.	Secuencia de montaje de placas estructurales . . . . .	46
18.	Matriz de decisión. . . . .	52
19.	Resumen de costos directos e indirectos . . . . .	77
20.	Resumen del cálculo de mano de obra . . . . .	78
21.	Bill of Materials del horno . . . . .	79
22.	Características estructurales horno #2 . . . . .	82
23.	Rendimiento Térmico del Horno . . . . .	83
24.	Resumen de parámetros estructurales . . . . .	83
25.	Resumen del análisis estructural . . . . .	84
26.	Resumen de parámetros para cálculo de $h$ . . . . .	86
27.	Rendimiento Térmico del Horno . . . . .	87
28.	Cronograma de actividades. . . . .	92
29.	Recurso de talento humano . . . . .	93
30.	<i>Estimación de recursos materiales.</i> . . . . .	93

## Lista de Figuras

1.	Remibrass S.A. . . . .	5
2.	Secuencia en el forjado con troquel impresor . . . . .	8
3.	Metodología de diseño . . . . .	13
4.	Distribución espacial de los hornos . . . . .	14
5.	Secuencia operativa del proceso de precalentamiento en los hornos de Remibrass	15
6.	Gramera . . . . .	17
7.	Báscula T-Scale . . . . .	17
8.	Modelo CAD del horno 2 con vistas de daño estructural. . . . .	20
9.	Dimensiones ladrillo refractario Recto Maxial . . . . .	21
10.	Guía visual de temperatura por color en metales . . . . .	24
11.	Termocupla tipo K y transmisor MAX6675 . . . . .	25
12.	Circuito resistivo del horno actual . . . . .	27
13.	Distribución de temperatura obtenida mediante simulación en ANSYS. . . .	31
14.	Diseño 1: Horno restaurado . . . . .	38
15.	Diseño 2: Primer modelo de horno a GLP . . . . .	39
16.	Diseño 3: Segundo modelo de horno a GLP . . . . .	40
17.	Diseño 4: Primer modelo de horno eléctrico . . . . .	41
18.	Diseño 5: Segundo modelo de horno eléctrico . . . . .	42
19.	Puertas extraíbles para sellado térmico . . . . .	43
20.	Base . . . . .	44
21.	Vista isométrica en corte del horno con recubrimiento interno. . . . .	45
22.	Quemadores . . . . .	47
23.	Niquelina . . . . .	48
24.	Distribución del flujo de calor – Diseño 1. . . . .	49
25.	Distribución del flujo de calor – Diseño 3. . . . .	50
26.	Distribución del flujo de calor – Diseño 5. . . . .	51
27.	Esquema de cargas. . . . .	53
28.	Perfil estructural. . . . .	54
29.	Esfuerzo máximo de la base. . . . .	56
30.	Deformación máxima de la base. . . . .	57
31.	Árbol de decisión para la selección del sensor de temperatura. . . . .	62
32.	Esquema de mando y fuerza. . . . .	63

33.	Diagrama P&ID. . . . .	64
34.	Esquema representativo del horno. . . . .	64
35.	Implementación del controlador PI en Simulink. . . . .	68
36.	Respuesta al escalón del sistema con controlador PI. . . . .	68
37.	Respuesta del sistema con parámetros ajustados mediante PID Tuner. . . . .	69
38.	Respuesta al escalón unitario del sistema discretizado. . . . .	71
39.	Diagrama de flujo de encendido del sistema. . . . .	72
40.	Diagrama de flujo para la fase de calentamiento. . . . .	73
41.	Diagrama de flujo de operación continua del horno. . . . .	74
42.	Propuesta referencial de pantallas HMI. . . . .	75
43.	Modelo representativo de la caja maestra. . . . .	76
44.	Registro de tiempos durante la carga y ajuste del material. . . . .	82
45.	Distribución térmica del horno por superficie. . . . .	85
46.	Distribución de pérdidas de calor - nueva propuesta. . . . .	87
47.	Comportamiento térmico sin regulación. Consigna de 120°C. . . . .	88
48.	Comportamiento térmico sin regulación. Consigna de 70°C. . . . .	89
49.	Comportamiento térmico con regulación PI. Consigna de 120°C. . . . .	90
50.	Comportamiento térmico con regulación PI. Consigna de 70°C. . . . .	90
51.	Comparación del tiempo de precalentamiento: sistema actual vs. sistema pro- puesto. . . . .	91

## Resumen

**E**l presente trabajo de titulación aborda el diseño estructural, térmico y funcional de un horno de precalentamiento para la producción de espartallamas en la empresa Remibrass. El horno actual, de construcción artesanal, presenta deficiencias que comprometen el aprovechamiento térmico, la seguridad operativa y la eficiencia energética. El objetivo principal del proyecto es desarrollar una propuesta técnica que mejore el desempeño del sistema, orientando a la empresa hacia una transición gradual hacia los estándares de la Industria 3.0.

El desarrollo del proyecto parte del levantamiento de datos en planta, la caracterización del proceso existente y la definición de los requerimientos funcionales del nuevo diseño. En la etapa de diseño se plantean tres modelos de horno: uno eléctrico, uno a gas con control manual y otro a gas con sistema automatizado. La alternativa seleccionada se evalúa mediante simulaciones computacionales que permiten analizar su comportamiento mecánico y térmico, mientras que el desempeño del sistema de control se verifica a través de herramientas especializadas de simulación.

Los resultados obtenidos evidencian que las soluciones integrales desde la ingeniería pueden incorporarse eficazmente en procesos industriales, aportando mejoras significativas en términos de eficiencia operativa y confiabilidad. Este tipo de intervenciones resalta la importancia de adaptar los recursos técnicos a las condiciones y requerimientos específicos de cada entorno productivo.

**Palabras clave:** Horno industrial, torcho, espartallamas, ladrillo refractario

## Abstract

**T**his thesis focuses on the structural, thermal, and functional design of a preheating furnace for the production of spark arrestors at the company Remibrass. The current furnace, built using artisanal methods, presents several deficiencies that affect thermal utilization, operational safety, and energy efficiency. The main goal of the project is to develop a technical proposal that improves the system's performance, guiding the company toward a gradual transition to Industry 3.0 standards.

The project begins with on-site data collection, characterization of the existing process, and definition of the functional requirements for the new design. During the design phase, three furnace models are proposed: an electric furnace, a gas-fired furnace with manual control, and a gas-fired furnace with an automated control system. The selected alternative is evaluated through computational simulations to analyze its mechanical and thermal behavior, while the performance of the control system is verified using specialized simulation tools.

The results obtained demonstrate that comprehensive engineering solutions can be effectively integrated into industrial processes, delivering significant improvements in operational efficiency and reliability. Such interventions highlight the importance of adapting technical resources to the specific conditions and requirements of each production environment.

**Keywords:** Industrial furnace, billet, spark arrestor, refractory brick.

# 1. Introducción

La industria metalúrgica cumple un rol fundamental en la transformación de materiales no ferrosos como el bronce, especialmente en procesos que requieren condiciones térmicas controladas para asegurar la calidad del producto final. Entre estos procesos, el precalentamiento de torchos permite mejorar la maleabilidad del material antes de ser conformado.

En la empresa REMIBRASS, este procedimiento se realiza actualmente con un horno de fabricación artesanal que, aunque cumple su función básica, presenta importantes limitaciones en cuanto a eficiencia, seguridad y control térmico. Su diseño, basado en criterios empíricos y sin sistemas de automatización, responde a una lógica tradicional que ya no se ajusta a las demandas actuales del sector.

La falta de aislamiento térmico adecuado, el manejo manual del sistema de combustión y la ausencia de instrumentos para monitorear la temperatura generan pérdidas de energía considerables y provocan variaciones en el calentamiento de las piezas. Estas condiciones afectan tanto la calidad del proceso como la seguridad del personal que lo opera.

Frente a esta situación, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar el desempeño del horno en uso, identificar sus principales limitaciones y proponer alternativas de mejora fundamentadas en criterios estructurales, térmicos y de eficiencia energética. El propósito es avanzar hacia un sistema más tecnificado y adaptable a los requerimientos reales de planta.

Para ello, se aplican herramientas de simulación numérica, principios de diseño mecánico y conceptos de automatización industrial, con el fin de validar propuestas que mejoren el funcionamiento del sistema sin perder de vista las condiciones particulares del entorno productivo. Este trabajo se orienta a generar soluciones aplicables en contextos similares, especialmente en pequeñas industrias, y pone en valor el rol de la ingeniería como herramienta clave para impulsar mejoras concretas, sostenibles y alineadas con los desafíos actuales de la producción.

## **2. Problema**

### **2.1. Descripción del problema**

Remibrass S.A. es una empresa dedicada a la fabricación de elementos de combustión para cocinas y cocinetas. En su línea de producción, enfrenta desafíos importantes en la etapa de precalentamiento del bronce, un proceso esencial para el troquelado del material. Actualmente, este procedimiento se lleva a cabo mediante hornos de características artesanales, que dependen del criterio y la experiencia del operador, lo que introduce variabilidad en la operación. Los hornos actuales funcionan con Gas Licuado de Petróleo (GLP) y tienen una estructura en forma de caja con dos aberturas para la carga y salida del material.

Este diseño genera pérdidas energéticas y dificulta la distribución uniforme de la temperatura, especialmente al procesar torchos de distintos tamaños dentro de la misma línea de producción. Para compensar esta irregularidad, los operarios deben reajustar manualmente la posición de los torchos dentro de la cámara y esperar hasta que alcancen la temperatura adecuada, lo que genera tiempos de inactividad de entre 5 y 20 minutos, según el tamaño de la pieza. Si a esto se suma el tiempo total requerido para completar el volumen de producción, el impacto en la continuidad del flujo de trabajo es aún mayor.

### **2.2. Antecedentes**

Remibrass S.A., ubicada en Cuenca, Ecuador, es una empresa dedicada a la fabricación de productos metálicos forjados y troquelados. Su portafolio incluye tres categorías principales de productos destinados al sector de la combustión: quemadores, espartallamas y tubos rampa para la distribución de gas. En la línea de fabricación de espartallamas el material de trabajo es el bronce, dividiendo al proceso en cuatro etapas principales: fundición, troquelado, acabado superficial y almacenamiento.

Esta línea de producción representa la mayor brecha tecnológica en el camino hacia la obtención del producto final. En particular, la etapa de troquelado incluye una subetapa de precalentamiento, cuya finalidad es mejorar la maleabilidad del bronce y así “minimizar el riesgo de agrietamiento o deformaciones indeseadas durante el corte” (Linde, 2023). Desde una perspectiva más amplia, la mejora de estos procesos es crucial para las industrias manufactureras ecuatorianas, que buscan adaptarse a estándares internacionales de eficiencia

y sostenibilidad.

De acuerdo con un estudio realizado por McKinsey & Company:

Las empresas que invierten en tecnología logran reducir, en promedio, un 15% de sus costos operativos en un plazo de dos años. Adicionalmente, según una encuesta realizada a directivos de empresas Fortune 500, el 70% considera que la implementación de tecnología ha sido fundamental para optimizar sus procesos internos y reducir gastos de manera significativa. (*¿Qué estrategias son más efectivas para reducir los costos operativos en una empresa?*, 2024)

En Remibrass, el precalentamiento se lleva a cabo en hornos artesanales contruidos con ladrillo refractario, un material capaz de resistir temperaturas de hasta 1.700 °C. La estructura aislante del horno está ensamblada con un cemento especial para este tipo de ladrillos y montada sobre un soporte de marcos metálicos. En el anexo 1 se presenta un ejemplo de los hornos utilizados en la empresa.

Estos hornos operan de manera manual, ya que carecen de automatización, lo que hace que su encendido y control dependan completamente del operador. Durante los turnos de 8 horas, el horno funciona de manera continua, y cualquier pausa debe gestionarse ajustando la potencia del soplete mediante una válvula de control. Además, la ausencia de un sistema de monitoreo de temperatura representa un desafío crítico, ya que “el éxito del precalentamiento depende de un control preciso y una distribución uniforme del calor” (Linde, 2023).

### **2.3. Importancia y alcances**

La mejora del proceso de precalentamiento es crucial para mantener la continuidad del flujo de trabajo en la línea de esparta llama de la empresa Remibrass S.A. En este proceso, la distribución uniforme de temperatura resulta esencial para reducir costos operativos y mejorar la eficiencia. La naturaleza artesanal de esta línea responde a un modelo asociado con la Industria 2.0, donde se introdujeron nuevas fuentes de energía como el petróleo y el gas natural, pero que hoy en día resulta insuficiente frente a los retos tecnológicos actuales.

Dado este contexto, y considerando la importancia de que las empresas ecuatorianas se adapten a estándares internacionales y refuercen su competitividad, se plantea avanzar hacia un concepto de Industria 3.0. Este enfoque permite la convergencia de tecnologías electrónicas e informáticas, dando paso a sistemas automatizados que optimizan los procesos productivos.

Además de resolver las necesidades actuales de la empresa, este avance sentará las bases para la digitalización de la información operativa, lo que abrirá la posibilidad de aplicar metodologías como Lean Manufacturing, mejorando la eficiencia y completando los procesos productivos actuales.

Este trabajo de titulación tiene como objetivo desarrollar una propuesta que contribuya a la mejora del proceso de precalentamiento. Esta solución beneficiará directamente a Remibrass S.A., al incrementar su productividad, reducir sus costos operativos y minimizar el impacto ambiental de su actividad. Además, el diseño propuesto está orientado a satisfacer las necesidades específicas de la empresa, mejorando la maleabilidad del bronce según los requerimientos particulares del proceso, sin buscar ajustarse a los estándares generales de un proceso térmico convencional.

El alcance de esta investigación incluye un análisis exhaustivo del sistema actual, la identificación de áreas críticas de mejora y la propuesta de estrategias tecnológicas que permitan mejorar el proceso de precalentamiento. Si bien el enfoque principal está en la línea de espartallamas, las conclusiones y recomendaciones podrían tener aplicaciones más amplias en otras áreas de la industria manufacturera local, ofreciendo una solución adaptable y eficiente para escenarios similares.

## **2.4. Delimitación**

El problema de estudio se delimitará en las siguientes dimensiones:

### **2.4.1. Espacial o geográfica**

La investigación se llevará a cabo en las instalaciones de la empresa Remibrass S.A., ubicada en la ciudad de Cuenca, Ecuador. La recopilación y el análisis de la información se centrarán exclusivamente en la línea de fabricación de espartallamas, dentro del entorno operativo de la planta industrial.

## Figura 1

*Remibrass S.A.*



**Nota:** Se observa las instalaciones correspondientes a Fibro Acero, espacio físico en el que también opera Remibrass.

### 2.4.2. Temporal

El presente trabajo de titulación se llevará a cabo a lo largo de 240 horas, correspondientes al tiempo asignado para la asignatura de Integración Curricular.

### 2.4.3. Sectorial o institucional

El estudio se enfocará en el sector manufacturero, específicamente en la industria de fabricación de productos metálicos forjados y troquelados destinados al sector de la combustión. La investigación estará delimitada a la empresa Remibrass S.A., que constituye el espacio institucional en el que se desarrollará el análisis del proceso de precalentamiento de la línea de espantallamas.

## **3. Objetivos**

### **3.1. Objetivo general**

- Diseñar un horno de precalentamiento de bronce para la producción de espartallamas en la empresa Remibrass S.A.

### **3.2. Objetivos Específicos**

- Analizar las condiciones actuales de operación del horno, identificando los parámetros estructurales, térmicos y operativos que determinan su desempeño.
- Diseñar una estructura mecánica y un sistema de generación de calor eficiente para el horno de precalentamiento de bronce para la producción de espartallamas en la empresa Remibrass S.A.
- Diseñar un sistema de control que permita monitorear la temperatura durante el proceso de precalentamiento de bronce en la producción de espartallamas en la empresa Remibrass S.A.
- Elaborar una propuesta presupuestaria para la implementación del horno desarrollado.

## **4. Marco Teórico**

El propósito de este marco teórico es establecer las bases necesarias para el diseño de un horno de precalentamiento para la línea de producción de espartallamas en Remibrass S.A. A través de la revisión de literatura, se abordan teorías y mejores prácticas en transferencia de calor, eficiencia energética y control de temperatura. Además, se identificarán las limitaciones del sistema actual, caracterizado por su diseño artesanal, que enfrenta problemas como pérdida de calor y largos períodos de inactividad, proponiendo soluciones adaptadas a las necesidades de la empresa para mejorar la eficiencia del proceso de producción.

### **4.1. Contexto de la empresa Remibrass S.A.**

Remibrass S.A. se dedica a la fabricación de productos metálicos forjados y troquelados, con un enfoque prioritario en el sector de la combustión. Entre sus principales líneas de productos se encuentran los quemadores, espartallamas y tubos rampa destinados a la

distribución de gas. Este trabajo de titulación se enfoca particularmente en el proceso de fabricación de espartallamas, por lo que se detalla el flujo de trabajo correspondiente.

El proceso inicia con la obtención de bronce, producto de la fundición de virutas de cobre-estaño. Un operador, utilizando un cangilón, vierte el metal fundido en moldes específicos, generando piezas denominadas "torchos" de bronce. Estos torchos se fabrican en tres tamaños distintos: mediano (90 g), grande (160 g) y jumbo (260 g). Una vez moldeadas, las piezas se trasladan a la etapa de troquelado, donde adquieren la forma característica del espartallamas.

Una vez completado el troquelado, los espartallamas presentan rebabas y una coloración superficial producto del proceso, de acuerdo al anexo 2. Para corregir estas imperfecciones, pasan a la etapa de acabado superficial. Aquí, operaciones como el cilindrado y el refrentado permiten obtener el aspecto visual y las dimensiones requeridas por el mercado. Finalmente, los productos terminados son almacenados en espera de su distribución a los clientes.

Se ha comprobado in situ que la maleabilidad óptima del bronce se alcanza aproximadamente a 800 °C, antes de llegar a su punto de fusión, que varía entre 900 °C y 1000 °C. Actualmente, este proceso se realiza en hornos de diseño abierto que presentan altas pérdidas de calor, ya que utilizan GLP como fuente de energía suministrado a través de un soplete que concentra el calor en un único punto. Esta ineficiencia obliga al operario a reordenar manualmente las piezas para mantener una temperatura uniforme.

Dado que la línea de producción trabaja con tres tamaños distintos, como se puede ver en el anexo 4, los tiempos de espera varían significativamente. Para el tamaño mediano, el tiempo de precalentamiento oscila entre 5 y 10 minutos, para el tamaño grande es de aproximadamente 15 minutos y para el jumbo alcanza alrededor de los 20 minutos. Estas diferencias, junto con las ineficiencias del sistema actual, afectan directamente la productividad de la línea.

## **4.2. Influencia de la Temperatura en la Deformación Volumétrica y el Forjado en Caliente**

La temperatura influye significativamente en las propiedades de los materiales, especialmente en su resistencia y ductilidad. Al alcanzar la temperatura de recristalización, aproximadamente la mitad del punto de fusión del material, el metal incrementa su capacidad para soportar deformaciones sin fracturarse, reduciendo considerablemente las fuerzas y la

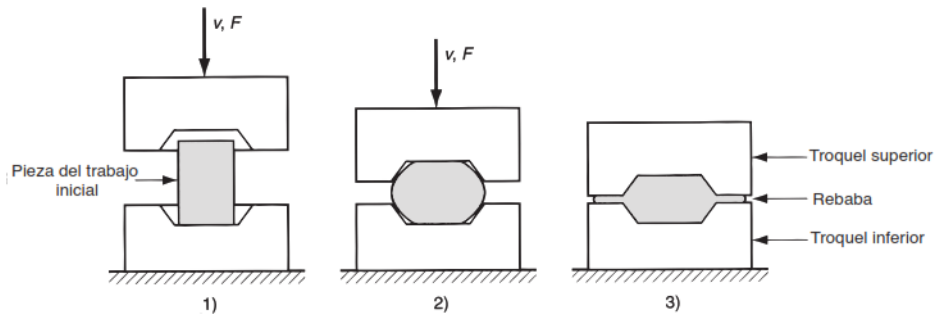
energía necesarias para el proceso. Este enfoque es esencial en los procesos de deformación volumétrica, donde el trabajo en frío es utilizado para deformaciones leves, mientras que el trabajo en caliente es adecuado para piezas de mayor volumen.

La mayoría de las operaciones de forjado se realizan en caliente debido a las exigencias del proceso y la necesidad de optimizar las propiedades del metal. El forjado consiste en aplicar presión sobre un material, ya sea de forma impactante mediante martinets de forja, o de manera gradual a través de prensas especializadas. Las operaciones varían dependiendo del grado de restricción que los troqueles imponen al flujo del material. En este sentido, se distinguen tres tipos principales de forjado: en troquel abierto, en troquel impresor y sin rebaba; cada uno diseñado para responder a diferentes requerimientos de diseño y producción.

En Remibrass, se utiliza el forjado en troquel impresor. En este método, el troquel contiene la forma inversa de la pieza final, y el proceso comienza con una pieza cilíndrica. Cuando el troquel se cierra y alcanza su posición final, el metal fluye más allá de la cavidad, generando una rebaba en la estrecha abertura entre las placas, véase la figura 2. En el forjado en caliente, esta rebaba cumple una función crucial, ya que se enfría rápidamente al contactar con las superficies del troquel, lo que incrementa la resistencia al flujo del metal. Esto obliga al material a llenar por completo la cavidad, garantizando así una mayor precisión dimensional.

## Figura 2

*Secuencia en el forjado con troquel impresor*



**Nota:** Adaptado de Fundamentos de manufactura moderna (p. 406), por M. P. Groover, 2007, McGraw-Hill.

A pesar de sus ventajas, el forjado en caliente presenta desafíos, ya que la deformación

genera calor, lo que puede elevar la temperatura en ciertas áreas de la pieza y aumentar el riesgo de fusión localizada, un defecto indeseable. Por esta razón, resulta esencial que el sistema de precalentamiento mantenga una temperatura constante y homogénea, asegurando así la calidad del proceso y evitando fallas durante la operación.

### **4.3. Diseño de sistemas de calentamiento**

En el proceso de diseño de hornos para tratamientos térmicos es fundamental contar con un aislamiento térmico adecuado, y es aquí donde los materiales refractarios juegan un papel crucial, ya que son capaces de soportar altas temperaturas. Las fibras cerámicas refractarias (FCR), los ladrillos refractarios aislantes (IFB) y los monolíticos son las principales soluciones disponibles, cada una con ventajas específicas según las condiciones del proceso. Las FCR son ideales para temperaturas inferiores a 1000°C, ya que ofrecen un excelente aislamiento, mayor eficiencia energética en procesos por lote y una gran resistencia al choque térmico.

Por su parte, los IFB son más apropiados para temperaturas superiores a 1000°C, ya que proporcionan una mayor eficiencia energética en procesos continuos y una mejor resistencia a los gases corrosivos. Los monolíticos son preferidos en ambientes abrasivos y en contacto con metal fundido debido a su resistencia superior, además de ofrecer una instalación más flexible, que puede realizarse mediante inyección o bombeo.

Seleccionar el tipo adecuado de refractario es fundamental para asegurar la durabilidad y eficiencia del horno. Factores como la resistencia a la temperatura, la estabilidad química y la resistencia mecánica son esenciales en esta elección. Sin embargo, los parámetros más importantes surgen de los mecanismos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. Según el fenómeno térmico a modelar, se aplicarán las ecuaciones correspondientes a cada uno de estos mecanismos para determinar la capacidad de aislamiento y, por lo tanto, la eficiencia del material.

#### **4.3.1. Conducción**

La conducción es el proceso mediante el cual la energía térmica se transfiere desde las partículas con mayor energía hacia aquellas con menor energía dentro de un material, debido a las interacciones entre ellas. La tasa de transferencia de calor por conducción se describe mediante la ley de Fourier de la conducción del calor.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \quad (\text{W}) \quad (1)$$

### 4.3.2. Convección

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que ocurre entre una superficie sólida y un fluido en movimiento, ya sea líquido o gas. Este proceso combina los efectos de la conducción térmica y el transporte de energía debido al flujo del fluido. A medida que la velocidad del fluido aumenta, la transferencia de calor por convección se intensifica. La ecuación que describe este fenómeno es la ley de enfriamiento de Newton.

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \quad (\text{W}) \quad (2)$$

### 4.3.3. Radiación

La radiación corresponde a la emisión de energía en forma de ondas electromagnéticas o fotones, generada por cambios en la configuración electrónica de átomos o moléculas. La cantidad máxima de energía radiada por una superficie está determinada por la ley de Stefan-Boltzmann.

$$\dot{Q}_{\text{emitida}} = \varepsilon\sigma A_s T_s^4 \quad (\text{W}) \quad (3)$$

## 4.4. Sistemas de control en hornos industriales

El control de la temperatura en estos hornos se realiza mediante termopares, que consisten en dos varillas metálicas unidas en un extremo soldado y conectadas a una unión fría. A través de los efectos Peltier y Thomson se genera una fuerza electromotriz proporcional a la diferencia de temperatura, la cual se mide con un milivoltímetro y se traduce en grados. Además, se han investigado implementaciones utilizando termocuplas tipo J y K, ampliamente empleadas en la industria para el control de altas temperaturas.

Con el avance de la tecnología, los métodos de control térmico han evolucionado desde soluciones básicas, como los sistemas ON/OFF, hasta la implementación de controladores más sofisticados, como los PID (Proporcional-Integral-Derivativo). Este tipo de controladores permite mantener la temperatura dentro de un rango específico, minimizando las fluctuaciones

y mejorando la eficiencia energética. En la actualidad, muchas soluciones comerciales incorporan estos sistemas avanzados, integrándolos junto con plataformas IoT, lo que posibilita desarrollar modelos de control adaptados a las necesidades específicas de cada horno.

#### **4.5. Tecnologías y soluciones en la industria**

En el contexto industrial actual, los procesos de tratamiento térmico requieren soluciones técnicas que ofrezcan precisión, eficiencia energética y adaptabilidad. Empresas como Hornos Samo Thermal y Nabertherm presentan desarrollos que ilustran los criterios técnicos empleados en el diseño de hornos industriales. Estos equipos están diseñados para alcanzar temperaturas elevadas de forma homogénea y con alta seguridad, lo que representa un criterio técnico relevante en el funcionamiento general de equipos térmicos industriales.

El control preciso de la temperatura constituye un factor determinante para asegurar la estabilidad del proceso térmico. Entre los controladores digitales más utilizados en el sector industrial se encuentran el REX-C400, el Omron E5CC y el Autonics TZN4S. Estos dispositivos operan mediante lógica PID y permiten configurar rampas de calentamiento, establecer puntos de consigna con alta precisión y activar alarmas de seguridad. Su compatibilidad con sensores térmicos como los termopares tipo K o tipo S y su integración a sistemas automatizados los convierte en herramientas clave para garantizar condiciones térmicas estables y repetibles.

En cuanto al sistema de generación de calor, los hornos eléctricos utilizan resistencias de aleación níquel-cromo (NiCr), capaces de operar a temperaturas superiores a los 1000 °C. Estas resistencias se distribuyen estratégicamente dentro de la cámara del horno para asegurar una transmisión de calor uniforme y una prolongada vida útil. Por otro lado, los hornos que operan con gas licuado de petróleo (GLP) o gas natural incorporan quemadores automáticos de alta eficiencia, que permiten alcanzar temperaturas operativas en menor tiempo y con una respuesta rápida ante variaciones de carga térmica.

El aislamiento térmico también desempeña un papel decisivo en el rendimiento del horno, al influir tanto en el consumo energético como en la seguridad del sistema. Los materiales utilizados para este fin incluyen ladrillos refractarios de alta alúmina y mantos de fibra cerámica, los cuales combinan resistencia a temperaturas extremas con baja conductividad térmica. En ciertos modelos, este aislamiento se complementa con estructuras metálicas robustas y recubrimientos resistentes a la oxidación, lo cual favorece la durabilidad del equipo

en ambientes de alta exigencia térmica.

La automatización de los hornos industriales permite optimizar los ciclos de precalentamiento y mantener la trazabilidad de los procesos. Los sistemas de control modernos incluyen paneles digitales que facilitan la programación de secuencias completas, desde el ascenso controlado de temperatura hasta la fase de enfriamiento. Estas interfaces brindan acceso a gráficas en tiempo real, almacenamiento de historiales y funciones de supervisión remota. Estas características aseguran consistencia en los resultados y eficiencia operativa en operaciones repetitivas.

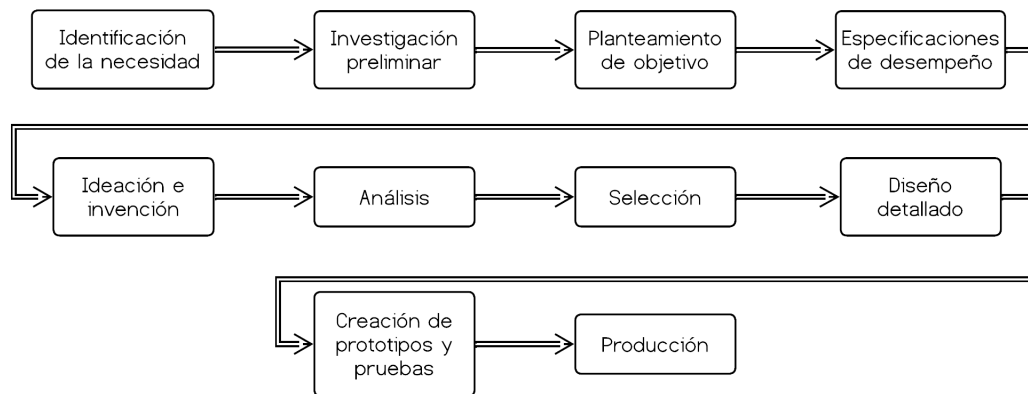
## **5. Marco metodológico**

El desarrollo de este trabajo implica una serie de actividades planificadas y ejecutadas de manera progresiva, con el objetivo de dar respuesta a las necesidades identificadas en la empresa. A lo largo de las distintas fases, se aplican métodos de análisis, observación y diseño, empleando herramientas y recursos específicos para alcanzar resultados concretos. En este apartado se expone el camino que se sigue, detallando las acciones que se llevan a cabo y las soluciones que se formulan en función de los objetivos propuestos.

Con el fin de organizar este proceso de manera estructurada, se adopta la metodología de diseño propuesta por Robert L. Norton. Esta herramienta metodológica permite abordar el problema de manera integral, proporcionando una visión global que guía cada etapa, desde la identificación de las necesidades hasta la formulación de una solución. A continuación, en la figura 3, se expone el esquema que describe las fases principales de dicha metodología, tal como se la aplica en este trabajo.

**Figura 3**

*Metodología de diseño*



**Nota:** Adaptado de Diseño de maquinaria (p. 7), por Robert L. Norton, 2013, McGraw-Hill.

## **5.1. Análisis de las condiciones actuales de operación del horno, parámetros estructurales, térmicos y operativos que determinan su desempeño.**

En alineación con la metodología de diseño propuesta por Robert L. Norton, este capítulo aborda las primeras cuatro fases: identificación de la necesidad, investigación preliminar, planteamiento del objetivo y especificaciones de desempeño, todas relacionadas con el primer objetivo de este trabajo. Dado que las fases de identificación de la necesidad y planteamiento del objetivo ya se trataron en la introducción, aquí se resumen brevemente sus aspectos clave. El enfoque principal se centrará en profundizar la investigación preliminar y definir las especificaciones de desempeño para las siguientes fases.

### **5.1.1. Identificación de la necesidad**

Remibrass S.A., dedicada a la fabricación de componentes de combustión, enfrenta limitaciones significativas en la etapa de precalentamiento del bronce, esencial para el conformado de espartallamas. Actualmente, este proceso se realiza en hornos artesanales, lo que genera pérdidas energéticas, variabilidad en la temperatura y tiempos de inactividad. La operación depende enteramente del criterio del operador, afectando la eficiencia del flujo de trabajo.

### 5.1.2. Investigación preliminar

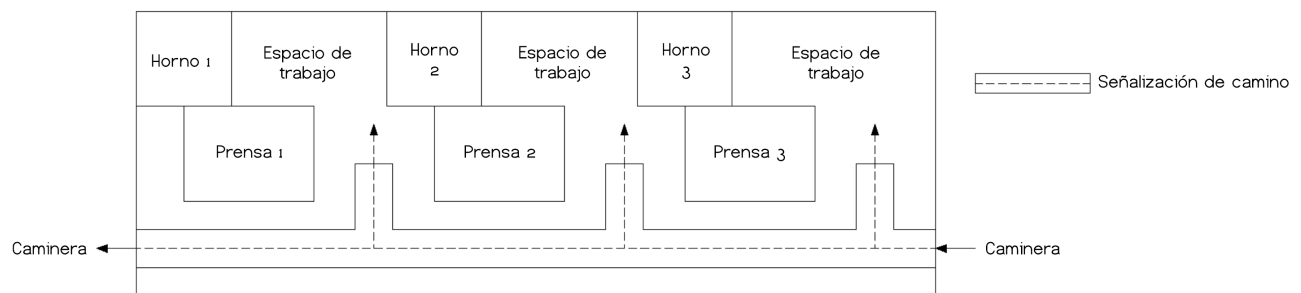
En este apartado se analiza en detalle las condiciones actuales de funcionamiento de los hornos utilizados en la etapa de precalentamiento, a partir de tres dimensiones clave: parámetros operativos, estructurales y térmicos. Esta información permite establecer una base sólida sobre la cual se definirán las especificaciones de desempeño y se tomarán decisiones fundamentadas en las siguientes etapas del diseño.

#### Parámetros operativos

Actualmente, Remibrass cuenta con tres hornos destinados a satisfacer la demanda de producción de la empresa. De manera habitual, se opera con un solo horno y un operario durante cada jornada de trabajo; sin embargo, este número puede incrementarse en función de las necesidades productivas. La función principal de esta etapa es el precalentamiento de los "torchos", piezas que posteriormente serán trabajadas en las prensas. Para efectos del presente análisis, en la figura 4 se presenta la distribución espacial de los hornos dentro de la planta y la nomenclatura adoptada para su identificación a lo largo del trabajo.

**Figura 4**

*Distribución espacial de los hornos.*



**Nota:** Distribución espacial de los hornos en el área de trabajo de la planta de Remibrass.

El proceso inicia con el encendido de un soplete, el cual constituye la fuente de calor principal y opera mediante el suministro de GLP. El operario, basándose en su experiencia, ajusta manualmente el flujo del gas a una llama baja, procurando alcanzar un calentamiento eficiente y minimizar el desperdicio de insumo. A partir de este momento, el horno comienza a

elevant su temperatura desde el ambiente (21,25 °C) hacia un nivel adecuado para garantizar la retención de calor en las piezas. Según registros tomados in situ, esta etapa de calentamiento se prolonga entre 17 y 30 minutos, dependiendo de las condiciones de operación.

Durante este intervalo, el operario realiza actividades complementarias que requieren de su criterio y pericia, como la selección del material y el registro en la bitácora de producción. Estas tareas incluyen clasificar los torchos por tamaño, contar las piezas y pesar el volumen a procesar. La Figura 5 ilustra de manera esquemática esta secuencia operativa, desde el encendido del soplete hasta la carga del material. Una vez completadas estas acciones, se procede con la introducción de los torchos en el horno, actividad cuyo tiempo varía en función del tamaño de cada pieza.

### Figura 5

*Secuencia operativa del proceso de precalentamiento en los hornos de Remibrass.*



**Nota:** Representación gráfica del proceso operativo en los hornos de precalentamiento.

La Tabla 1 resume los tiempos promedio requeridos para la carga y el ajuste de posición según el tipo de torcho identificado en el proceso.

**Tabla 1**

*Tiempos de carga de material.*

<b>Tamaño del torcho</b>	<b>Tiempo de carga</b>	<b>Tiempo de ajuste</b>
Mediano	3 min 20 s	40 s
Grande	1 min 44 s	15 s
Jumbo	1 min 08 s	10 s

**Nota:** El tiempo de carga corresponde al lapso utilizado para introducir los torchos en el interior del horno, mientras que el tiempo de ajuste se refiere a su correcta distribución dentro del mismo. Por motivos de confidencialidad, los volúmenes de trabajo han sido omitidos.

Una vez completada la carga y el ajuste de material en el horno, inicia el proceso productivo. Desde este punto, se realizaron mediciones específicas de los principales parámetros operativos: peso individual de los torchos, tiempo hasta la primera pieza, intervalos de conformado, número aproximado de pausas, tiempo total de producción por lote y consumo estimado de GLP. Este último se basa en la experiencia operativa de Remibrass, donde, debido a las variaciones en la regulación del caudal, el personal reporta un consumo promedio de un cilindro de GLP por jornada laboral.

Estas actividades se realizaron con las herramientas disponibles en la empresa, como una gramera y una báscula de la marca T Scale, cuyos modelos se muestran en las figuras 6 y 7. También se utilizó un cronómetro básico para el registro de tiempos.

**Figura 6**

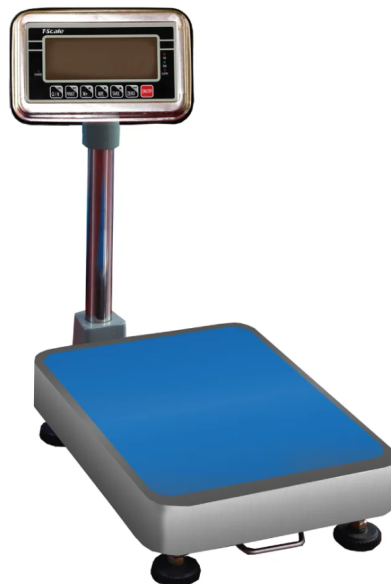
*Gramera*



**Nota:** La gramera utilizada es un modelo de precisión con capacidad de 0.01 g. Tomado de Amazon.

**Figura 7**

*Báscula T-Scale*



**Nota:** La báscula utilizada es del modelo BWE, con una precisión de 10 g. Tomado de Balanzas Precisur.

A continuación, se detallan los datos relevantes obtenidos del proceso productivo para los torchos de tamaño mediano, presentados en la siguiente tabla.

**Tabla 2**

*Resumen de parámetros operativos - Torchos medianos.*

<b>Peso promedio</b>	<b>Tiempo primera pieza</b>	<b>Intervalo entre piezas</b>	<b>Tiempo conformado</b>	<b>Pausas</b>	<b>Tiempo total lote</b>
101,19 g	6 min 19 s	6 s	3 s	14	8 h 35 min

**Nota:** Los valores corresponden a promedios obtenidos del 25% del lote.

Seguido a esto, se presentan los resultados correspondientes a los torchos de tamaño grande.

**Tabla 3**

*Resumen de parámetros operativos - Torchos grandes.*

<b>Peso promedio</b>	<b>Tiempo primera pieza</b>	<b>Intervalo entre piezas</b>	<b>Tiempo conformado</b>	<b>Pausas</b>	<b>Tiempo total lote</b>
177,079 g	6 min 30 s	15 s	4 s	20	4 h 37 min

**Nota:** Los valores corresponden a promedios obtenidos del 25% del lote.

Finalmente, se muestra la información asociada a los torchos de tamaño jumbo.

**Tabla 4***Resumen de parámetros operativos - Torchos jumbo.*

<b>Peso promedio</b>	<b>Tiempo primera pieza</b>	<b>Intervalo entre piezas</b>	<b>Tiempo conformado</b>	<b>Pausas</b>	<b>Tiempo total lote</b>
288,24 g	14 min 17 s	20 s	7 s	7	3 h 25 min

**Nota:** Los valores corresponden a promedios obtenidos del 25% del lote.

Además de los valores cuantitativos obtenidos, durante la recopilación de datos se identificaron varios aspectos relevantes del proceso operativo. Entre ellos, se observó que el operador, al mantener el horno encendido, desconoce el momento exacto en que se alcanza la temperatura de trabajo, se realizan constantes ajustes en el caudal de GLP, se producen interrupciones producto de la operación de la prensa, algunos torchos se sobrecalientan y se presentan condiciones de inseguridad en el área de trabajo.

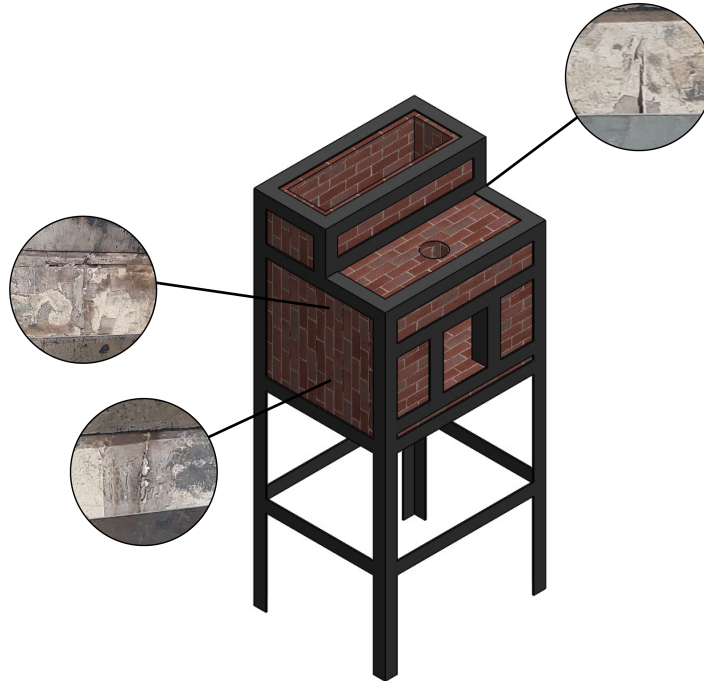
### **Parámetros estructurales**

Tras el análisis de los parámetros operativos, se procede a caracterizar los hornos de precalentamiento. Cada horno cuenta con dos aberturas principales para la manipulación de los torchos: una abertura superior, destinada a la carga del material, y una abertura frontal, que facilita el flujo de trabajo. Además, incorporan una abertura adicional para el suministro de calor mediante un soplete.

Actualmente se dispone de tres unidades, de las cuales se selecciona el horno 2 para el análisis principal, al ser el más utilizado y presentar mejores condiciones estructurales. La Figura 8 muestra su modelo CAD, elaborado a partir de mediciones en planta. Para reflejar con mayor precisión el estado real del equipo, se incorporan vistas detalladas que evidencian las fisuras observadas en su estructura. También se presenta una tabla comparativa con las principales características de los tres hornos, como volumen, materiales, estado físico y dimensiones. La información técnica completa del horno 2 se encuentra en los anexos.

## Figura 8

*Modelo CAD del horno 2 con vistas de daño estructural.*



**Nota:** Detalles integrados a partir de observaciones en planta.

A continuación, se presenta un resumen comparativo de las características principales de los tres hornos de precalentamiento evaluados.

**Tabla 5**

*Comparativo de hornos de precalentamiento.*

Horno	Dimensiones	Volumen	Materiales constructivos	Disposición física
1	0.56 m × 0.53 cm × 1.39 m	58,17 L	Acero estructural,	Abierto
2	0.67 m × 0.55 m × 1.51 m	74,82 L	ladrillo refractario,	
3	0.59 m × 0.5 cm × 1.40 m	32,97 L	mortero	

**Nota:** Las dimensiones corresponden a las medidas exteriores de cada horno. El volumen indica el espacio útil de la cámara de calentamiento, donde se alojan los torchos.

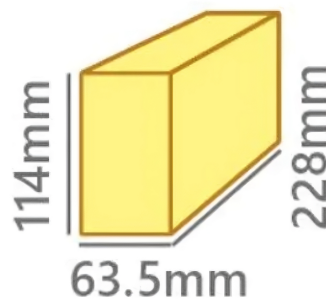
Una vez comparadas las características generales de los hornos, se procede a describir los materiales empleados en su construcción. Para ello, se definen dos conjuntos principales: por un lado, la estructura metálica fabricada a partir de platinas de acero estructural; y por otro, los materiales que conforman la cámara interna, desarrollada íntegramente con ladrillo refractario y ensamblada mediante mortero refractario. Dado que el enfoque principal de este trabajo es el análisis térmico, se profundiza a continuación en las propiedades del ladrillo y del mortero refractario utilizados.

El ladrillo refractario empleado corresponde al modelo Recto Maxial, el cual constituye el revestimiento completo de la cámara y cumple la función esencial de conservar el calor generado por la combustión de GLP. Para su correcta instalación se utiliza un mortero refractario, diseñado para unir ladrillos refractarios o aislantes entre sí, a la estructura metálica, o a revestimientos preexistentes. A continuación, se presentan las principales características de estos dos materiales.

La Figura 9 muestra las dimensiones del ladrillo refractario modelo Recto Maxial.

### **Figura 9**

*Dimensiones ladrillo refractario Recto Maxial.*



**Nota:** Tomado de Termimex-Soluciones Industriales.

Con base en las especificaciones del proveedor RHI Magnesita, en la Tabla 6 se resumen las principales propiedades físicas, químicas y mecánicas del ladrillo Recto Maxial 210 M.

**Tabla 6**

*Características principales del ladrillo refractario Recto Maxial 210 M.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Contenido de SiO <sub>2</sub>	48,0%
Contenido de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	46,0%
Densidad aparente	2,28 g/cm <sup>3</sup>
Porosidad aparente	18%
Resistencia a la compresión en frío	>30 MPa
Resistencia al choque térmico (agua)	30 ciclos
Conductividad térmica 500°C	1,20 W/mK
Conductividad térmica 750°C	1,30 W/mK
Conductividad térmica 1000°C	1,40 W/mK

**Nota:** Las propiedades térmicas y mecánicas listadas corresponden a ensayos bajo normas ASTM y EN. Tomado de Termochisa.

Para complementar la caracterización del material refractario, también se detalla el mortero utilizado en la construcción de los hornos. La correcta elección del mortero es fundamental para garantizar la integridad estructural de la cámara refractaria, ya que su comportamiento térmico y mecánico debe estar en sinergia con el ladrillo. Un mortero inadecuado podría generar fisuras, pérdidas de calor o fallos prematuros en condiciones de operación cíclica. La Tabla 7 resume las propiedades principales del mortero refractario empleado en la construcción de los hornos.

**Tabla 7**

*Características principales del mortero refractario utilizado.*

<b>Propiedad</b>	<b>Valor</b>
Tipo	Húmedo de fraguado al aire
Contenido de SiO <sub>2</sub>	49,1%
Contenido de Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44,7%
Cono pirométrico equivalente	1600–1724 °C
Agua de preparación (palustre)	Como se entrega
Consumo aproximado	180 kg / 1000 ladrillos
Presentación	Tambor de 25 kg

**Nota:** Las propiedades listadas corresponden a ensayos bajo normas ASTM y NTC aplicables.

Con los materiales ya caracterizados, se establece que la construcción del horno es de tipo artesanal. Las paredes de la cámara refractaria están formadas por una hilera de ladrillos colocados verticalmente, es decir, el espesor de cada pared equivale al grosor de un solo ladrillo. Esta técnica de apilamiento sencillo refleja un enfoque práctico, aunque con el tiempo ha generado vulnerabilidades. De hecho, se han identificado fisuras en la estructura interna, producto del envejecimiento natural de los materiales así como la falta de mantenimiento preventivo a lo largo de los años.

Los torchos son introducidos en la cámara a través de la abertura superior, donde se apilan unos sobre otros y su posición final es ajustada manualmente por el operador mediante el uso de una pinza. Esta forma de carga influye directamente en la distribución térmica dentro del horno y, en consecuencia, en la eficiencia del proceso de precalentamiento, aspectos que serán analizados en detalle más adelante.

### **Parámetros térmicos**

El análisis térmico del horno parte de un contexto limitado: no existen sistemas instalados para registrar o controlar la temperatura, haciendo que el proceso dependa íntegramente de la experiencia del operador. Durante la operación típica, los torchos se cargan por la parte superior y se disponen dentro de la cámara hasta alcanzar el “rojo vivo”, una referencia visual que

los operadores reconocen como señal de que el material ha llegado a su temperatura de trabajo. Este brillo suele corresponder a unos 800 °C aproximadamente, como se muestra en la figura 10.

**Figura 10**

*Guía visual de temperatura por color en metales.*

Approximate Base Metal Temperature			
	°F	°C	°K
Faint Red	930	500	770
Blood Red	1075	580	855
Dark Cherry	1175	635	910
Medium Cherry	1275	690	965
Cherry	1375	745	1020
Bright Cherry	1450	790	1060
Salmon	1550	845	1115
Dark Orange	1630	890	1160
Orange	1725	940	1215
Lemon	1830	1000	1270
Light Yellow	1975	1080	1355
White	2200	1205	1480

**Nota:** La imagen se presenta como una referencia visual aproximada. Aunque está orientada a la soldadura de cobre, latón y acero, su escala de colores también resulta útil para estimar temperaturas en metales como el bronce. Tomado de HVAC School.

Ante esta situación, fue necesario aplicar métodos alternativos para obtener datos representativos. Se empleó una termocupla tipo K con transmisor MAX6675, lo que permitió registrar temperaturas puntuales dentro de la cámara, aunque con una cobertura espacial reducida. A pesar de estas limitaciones, los datos obtenidos resultaron útiles para contrastar y complementar las observaciones directas del funcionamiento del horno. La figura 11 ilustra el equipamiento utilizado.

## Figura 11

*Termocupla tipo K y transmisor MAX6675.*



**Nota:** Tomado de AV Electronics.

En la Tabla 8 se presenta un resumen de los datos.

## Tabla 8

*Resumen de mediciones térmicas del horno artesanal.*

Descripción de la medición	Ubicación o condición	Resultado	Observaciones
Temperatura promedio del ambiente	Zona externa al horno	21,25 °C	Medición previa al encendido
Tiempo estimado para alcanzar temperatura operativa	Centro de la cámara	800 °C en 12 minutos	Desde el encendido del soplete
Temperatura promedio registrada	Zona cercana al soplete	815 °C	Promedio de 3 lecturas puntuales

**Nota:** Las mediciones fueron obtenidas mediante una termocupla tipo K conectada a un módulo MAX6675 y registradas en intervalos específicos durante la operación.

Los registros experimentales confirman que el umbral térmico para alcanzar el “rojo vivo” se sitúa alrededor de los 800 °C. A partir de este dato, se identifica que una pieza tarda entre 6 y 14 minutos en alcanzar dicha temperatura desde ambiente, dependiendo tanto de su

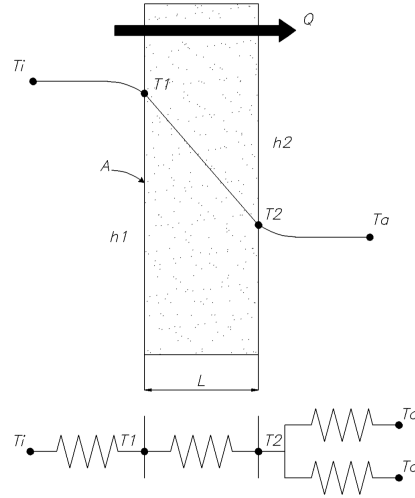
ubicación dentro del horno como del tamaño del torcho. Esta variación se debe principalmente a la distribución heterogénea del calor: las zonas más próximas al soplete, única fuente de calor, alcanzan temperaturas más altas, mientras que las áreas más alejadas o próximas a las aberturas presentan un calentamiento considerablemente menor.

El diseño abierto del horno, sumado a un aislamiento limitado, genera pérdidas térmicas importantes por convección y radiación. Esta falta de retención de calor obliga a mantener el soplete encendido durante toda la jornada, ya que apagarlo implica un enfriamiento acelerado del horno y, en consecuencia, de los torchos, afectando su trabajabilidad. Además, esta ausencia de control térmico produce variaciones de temperatura difíciles de manejar: en ocasiones se registran sobrecalentamientos que provocan que los torchos se adhieran a las matrices durante el prensado, generando defectos o pérdidas de piezas.

El horno opera bajo el principio de convección natural, en el que, según Cengel (2003), el movimiento del fluido se produce por medios naturales, como la flotación térmica. A partir de esta condición, se recurre a un modelo de resistencias térmicas equivalentes para estimar las pérdidas de calor, representando el flujo térmico desde el aire interior, hacia el ambiente. El modelo contempla una transferencia de calor por convección desde el aire caliente hasta la superficie interna de la pared, conducción a través del ladrillo refractario y, finalmente, convección externa hacia el ambiente. Este enfoque se ilustra en la figura 12.

## Figura 12

*Circuito resistivo del horno actual.*



**Nota:** Representación análoga del flujo de calor a través de una pared mediante un circuito eléctrico.

Para la figura antes mostrada se tiene que:

$\dot{Q}$	= Razón de transferencia de calor	[W]
$L$	= Espesor del ladrillo	[m]
$T_i$	= Temperatura interior del horno	[°C]
$T_1$	= Temperatura de la cara interior del horno	[°C]
$T_2$	= Temperatura en la cara exterior del horno	[°C]
$T_a$	= Temperatura ambiente	[°C]

La razón de transferencia de calor total se calcula de la siguiente manera:

$$\dot{Q} = \frac{T_i - T_a}{R_{Total}} \quad (4)$$

En donde  $R_{Total}$  es la sumatoria de las resistencias del sistema [°C/W], por lo que:

$$R_{Total} = R_{Interior} + R_{Ladrillo} + \frac{R_{conv\_ext} \cdot R_{rad}}{R_{conv\_ext} + R_{rad}} \quad (5)$$

Tomando en cuenta los mecanismos de transferencia de calor involucrados, la resistencia térmica por conducción a través del ladrillo se expresa como:

$$R_{Cond} = \frac{L}{kA} \quad (6)$$

En donde:

$$\begin{aligned} L &= \text{Espesor de la pared} && [\text{m}] \\ k &= \text{Conductividad térmica del material} && [\text{W/mK}] \\ A &= \text{Área de la pared} && [\text{m}^2] \end{aligned}$$

Por otro lado, tanto en la superficie interna como en la externa del sistema, el calor se transfiere por convección, cuya resistencia térmica se define como:

$$R_{Conv} = \frac{1}{hA} \quad (7)$$

En donde:

$$\begin{aligned} h &= \text{Coeficiente de transferencia de calor} && [\text{W/m}^2\text{°C}] \\ A &= \text{Área de la pared} && [\text{m}^2] \end{aligned}$$

Adicionalmente, en la superficie exterior también se considera la transferencia de calor por radiación térmica hacia el entorno. La resistencia asociada a este fenómeno se calcula mediante la siguiente expresión linealizada:

$$R_{rad} = \frac{1}{\varepsilon\sigma A(T_s^2 + T_\infty^2)(T_s + T_\infty)} \quad (8)$$

En donde:

$$\begin{aligned} \varepsilon &= \text{Emisividad del material} && [0 - 1] \\ \sigma &= \text{Constante de Stefan-Boltzmann} && [\text{W/m}^2\text{K}^4] \\ A &= \text{Área de la pared} && [\text{m}^2] \\ T_s &= \text{Temperatura de la superficie} && [\text{K}] \\ T_\infty &= \text{Temperatura ambiente} && [\text{K}] \end{aligned}$$

Las pérdidas de calor por convección se calculan tanto en las paredes exteriores del horno como en las aberturas existentes. El coeficiente de convección  $h$  depende de la orientación y dimensiones de cada superficie, por lo que su valor varía en función del caso analizado. Para estimarlo, se recurre al número de Nusselt ( $Nu$ ), el cual permite expresar el coeficiente

convectivo de forma práctica mediante relaciones adimensionales.

Dado que  $h$  no se conoce directamente, se emplean correlaciones empíricas que vinculan el número de Nusselt con parámetros como el número de Rayleigh ( $Ra$ ) y el número de Prandtl ( $Pr$ ). Esto permite obtener una estimación razonable del coeficiente convectivo en régimen de convección natural:

$$Nu = \frac{hL_c}{k} = C(Gr_L Pr)^n = C Ra_L^n \quad (9)$$

donde  $Ra_L$  representa el número de Rayleigh, producto del número de Grashof y de Prandtl:

$$Ra_L = Gr_L Pr = \frac{g\beta(T_s - T_\infty)L_c^3}{\nu^2} Pr \quad (10)$$

Los valores de las constantes  $C$  y  $n$ , así como los rangos de validez de cada correlación, dependen de la geometría de la superficie y del régimen de flujo involucrado. Para este análisis, se ha utilizado como referencia la tabla 9-1 del libro *Transferencia de calor y masa. Un enfoque práctico* de Yunus Cengel, que reúne diversas expresiones empíricas para convección natural. A continuación, se detallan las expresiones utilizadas en el cálculo del coeficiente de convección:

- **Pared vertical:**

$$Nu = \left( 0.825 + \frac{0.387 Ra^{1/6}}{\left[ 1 + \left( \frac{0.492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27}} \right)^2 \quad (11)$$

- **Superficie horizontal caliente hacia arriba:**

$$Nu = 0.27 Ra^{1/4} \quad (12)$$

- **Superficie horizontal caliente hacia abajo:**

$$Nu = \begin{cases} 0.54 Ra^{1/4}, & \text{si } Ra < 10^7 \\ 0.15 Ra^{1/3}, & \text{si } Ra \geq 10^7 \end{cases} \quad (13)$$

- **Cilindro vertical:**

Un cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical cuando

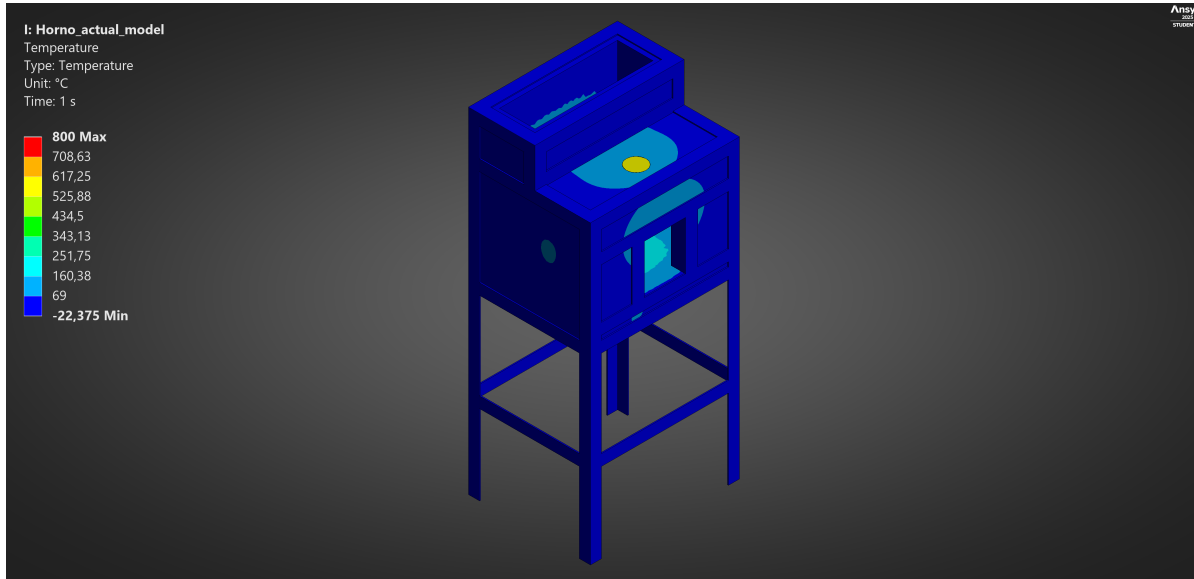
$$D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}} \quad (14)$$

Frente a estas condiciones, se lleva a cabo una simulación computacional en ANSYS con el objetivo de obtener la distribución de temperaturas necesaria para el análisis térmico. Para ello, se aplica una fuente térmica equivalente a la temperatura operativa del horno (800 °C), junto con condiciones de frontera que simulan su entorno real de funcionamiento. Dado que el entorno de simulación requiere un valor estimado del coeficiente de convección ( $h$ ), se adoptan valores referenciales basados en la literatura técnica de SolidWorks: 5 W/m<sup>2</sup>,°C para las superficies internas del horno y 25 W/m<sup>2</sup>,°C para las externas.

Esta elección responde al hecho de que el interior del horno presenta un flujo de aire considerablemente menor en comparación con el exterior, ya que opera en un ambiente abierto. Cabe destacar que estos valores iniciales de  $h$  se utilizan únicamente como referencia para obtener una primera aproximación de la distribución térmica en cada pared y abertura. Estos valores se ajustan posteriormente según el procedimiento descrito anteriormente. La figura 13 muestra la distribución general de temperaturas obtenida mediante simulación en ANSYS.

### Figura 13

*Distribución de temperatura obtenida mediante simulación en ANSYS.*



**Nota:** Simulación elaborada mediante el módulo de análisis térmico de ANSYS.

A partir de los resultados de la simulación, se han identificado zonas con distintos rangos térmicos dentro y fuera del horno, lo que permite asignar a cada superficie un valor promedio representativo de temperatura. Estos datos, recopilados en la tabla 9, constituyen una base fundamental para el cálculo posterior de los coeficientes de transferencia de calor por convección.

**Tabla 9***Distribución térmica por superficie del horno actual.*

<b>Elemento</b>	<b>Aire Interno</b> [°C]	<b>Superficie Interna</b> [°C]	<b>Superficie Externa</b> [°C]
Pared posterior	65.755	85.304	46.291
Paredes laterales	74.312	95.652	47.061
Pared frontal	123.91	153.77	60.362
Pared frontal superior	54.436	73.633	40.957
Pared inferior	105.61	137.56	105.13
Pared superior	132.09	141.77	61.71
Abertura frontal	120.49	—	—
Abertura superior	120.49	—	—
Abertura cilíndrica	120.49	—	—

**Nota:** Las temperaturas corresponden al diseño actual del horno y fueron obtenidas mediante simulación térmica. Cada valor representa un promedio sobre la superficie correspondiente.

A partir de las temperaturas previamente determinadas, se procede al cálculo del número de Nusselt y del coeficiente de transferencia de calor por convección ( $h$ ) para cada superficie interna y externa del horno, conforme a las ecuaciones presentadas entre las expresiones (9) y (13). La tabla 26 resume los valores obtenidos, detallando la longitud característica ( $L$ ) y la disposición de cada superficie, parámetros clave en la estimación de los resultados.

**Tabla 10**

*Parámetros utilizados y coeficientes de convección obtenidos por superficie.*

<b>Elemento</b>	<b>L [m]</b>	<b>Nu</b>	<b>h [W/m<sup>2</sup>°C]</b>	<b>Disposición</b>
Pared interior posterior	0.585	73.812	3.6853	Vertical
Pared interior lateral	0.1031	16.531	4.7914	Vertical
Pared interior frontal	0.343	41.515	4.074	Vertical
Pared interior frontal superior	0.242	35.228	4.1305	Vertical
Pared interior inferior	0.1149	9.152	2.5856	Horizontal hacia arriba
Pared interior superior	0.085	10.377	4.0929	Horizontal hacia abajo
Abertura frontal	0.225	51.918	6.6623	Vertical
Abertura superior	0.0615	8.892	4.1744	Horizontal hacia arriba
Abertura cilindro	0.22	50.896	6.6795	Cilindro vertical
Pared exterior posterior	0.655	105.637	4.2189	Vertical
Pared exterior lateral	0.1446	27.927	5.057	Vertical
Pared exterior frontal	0.478	87.83	41.8277	Vertical
Pared exterior frontal superior	0.177	31.125	4.5653	Vertical
Pared exterior inferior	0.1487	16.962	3.2296	Horizontal hacia arriba
Pared exterior superior	0.0907	21.069	45.3878	Horizontal hacia abajo

**Nota:** Los valores de Nu y  $h$  se calculan en función de las temperaturas simuladas y las condiciones de convección natural en aire.

De acuerdo con los parámetros previamente establecidos y con base en el esquema presentado en la figura 12, se calcularon las pérdidas térmicas correspondientes a cada superficie del horno. Para ello, se considera un espesor de ladrillo de 0.065 m y una conductividad térmica de 1.3 W/m · K. La tabla 11 resume las pérdidas de calor estimadas para cada superficie, así como el valor total resultante.

**Tabla 11**

*Pérdidas de calor calculadas para cada superficie del horno.*

<b>Superficie</b>	<b>Área [m<sup>2</sup>]</b>	<b>Q [W]</b>
Pared posterior	0.4336	45.4054
Paredes laterales	0.7074	93.2683
Pared frontal	0.3164	102.8466
Pared frontal superior	0.1172	9.8386
Pared inferior	0.3575	55.99
Pared superior	0.1655	58.5611
Abertura frontal	0.0439	59.7927
Abertura superior	0.0851	94.9851
Abertura cilíndrica	0.0064	8.6806
<b>Total</b>		<b>529.3682</b>

**Nota:** Los valores fueron calculados considerando el coeficiente de convección obtenido para cada superficie y su correspondiente diferencial de temperatura.

La sumatoria de  $Q_{\text{total}}$ , correspondiente a la transferencia térmica por convección natural y radiación, equivale a una potencia de 529.36 W. Para incorporar esta pérdida en el cálculo de la eficiencia del horno, se requiere determinar la energía térmica asociada a dicha potencia en un intervalo de tiempo representativo. En este análisis, se adopta un periodo de 1 hora, por lo que la energía total disipada por las paredes se obtiene mediante la siguiente expresión:

$$Q_{\text{superficies}} = \frac{529.3682 \text{ W} \cdot 3600s}{1000}$$

$$Q_{\text{superficies}} = 1905.73 \text{ kJ}$$

Para una evaluación integral de la eficiencia, se definen las propiedades térmicas del material de trabajo y del combustible empleado. El material corresponde a bronce reciclado, cuya composición exacta no puede establecerse, ya que depende de insumos de terceros. Considerando que el bronce suele contener entre 80–90% cobre y 10–20% estaño, se recurre al software *Ansys Granta EduPack* para identificar un material representativo con posibles impurezas. En este contexto, se selecciona el bronce C90810, cuyo calor específico varía entre

376 y 392 J/kg · °C, adoptándose el valor superior para el presente análisis.

En lo que respecta al combustible, se considera gas licuado de petróleo (GLP), cuya composición típica en Ecuador corresponde aproximadamente a un 70 % de propano y 30 % de butano. Dado que durante la operación del horno no se aprovecha el calor latente de condensación del vapor de agua generado en la combustión, se emplea el poder calorífico inferior (PCI) como referencia. La estimación ponderada del PCI de la mezcla se expresa mediante la siguiente relación:

$$C_{p_{\text{GLP}}} = 0.7 \cdot (12,86 \text{ kWh/kg}) + 0.3 \cdot (12,44 \text{ kWh/kg})$$

De esta expresión se obtiene un valor energético equivalente a:

$$C_{p_{\text{GLP}}} = 12.73 \text{ kWh/kg}$$

Para convertir este valor a unidades del SI, se considera que 1 kWh = 3600 kJ, lo que permite expresar el poder calorífico en:

$$C_{p_{\text{GLP}}} = 45\,828 \text{ kJ/kg}$$

Finalmente, se establece que el rango térmico aplicado a los torchos abarca desde los 21.25 °C hasta los 800 °C, condición esencial dentro del análisis energético. Cabe señalar que, en cumplimiento de los acuerdos de confidencialidad suscritos con la empresa, algunos datos específicos que se emplean en los cálculos no se detallan en este documento. No obstante, estos valores se integran en el desarrollo del análisis, garantizando la precisión y validez técnica del estudio. En este contexto, el calor suministrado por el soplete corresponde a:

$$Q_{\text{suministrado}} = 85\,927.5 \text{ kJ}$$

Para determinar el calor útil, es decir, la cantidad de energía absorbida por los torchos, se aplica la siguiente expresión:

$$Q_{\text{útil}} = m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (15)$$

No obstante, dado que durante el proceso de calentamiento no todos los torchos reciben calor de manera uniforme, sino principalmente aquellos ubicados en proximidad directa a la fuente térmica, se introduce una variable adicional en la ecuación (15) que representa la

fracción efectiva de piezas realmente calentadas. Esta fracción corresponde a los torchos que se encuentran más cercanos al soplete o que mantienen una línea de vista directa con la llama. En este contexto, la expresión para el cálculo del calor útil se formula de la siguiente manera:

$$Q_{\text{útil}} = F_{\text{efectiva}} \cdot m \cdot C_p \cdot \Delta T \quad (16)$$

Sustituyendo los valores correspondientes:

$$Q_{\text{útil}} = 1172.24 \text{ kJ}$$

A partir de este resultado, y considerando el calor suministrado por el soplete  $Q_{\text{suministrado}}$ , se calcula la pérdida térmica total como la diferencia entre esta energía y la suma del calor absorbido por la masa  $Q_{\text{útil}}$  más el calor disipado hacia el ambiente a través de las superficies del horno  $Q_{\text{superficies}}$ . La inclusión de este último término, que representa la energía que escapa irreversiblemente del sistema, permite establecer un balance energético más representativo del comportamiento real del proceso. La expresión de esta pérdida total se presenta como:

$$Q_{\text{pérdidas}} = 82849.54 \text{ kJ}$$

De esta forma, la eficiencia térmica se determina como la relación entre el calor útil y el calor suministrado, expresando el rendimiento real del proceso.

$$\eta = \left( \frac{Q_{\text{útil}}}{Q_{\text{suministrado}}} \right) \times 100 \quad (17)$$

Considerando que únicamente el 5 % de la masa total de torchos recibe calor de forma efectiva, la eficiencia térmica del horno bajo esta condición se estima en

$$\eta = 1.36\%$$

### 5.1.3. Planteamiento de objetivo

A partir del análisis de los parámetros operativos, estructurales y térmicos del horno actual, se identifica que el proceso de precalentamiento del bronce presenta condiciones que pueden ser mejoradas para incrementar la eficiencia energética y operativa dentro de la línea de producción de espartallamas de la empresa Remibrass S.A. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo proponer una solución mediante el diseño de un nuevo horno que responda a las necesidades detectadas, contribuya al aprovechamiento adecuado de los

recursos disponibles y fortalezca el desempeño del proceso productivo.

#### **5.1.4. Especificaciones de desempeño**

Con base en los hallazgos obtenidos durante la fase de análisis y considerando las condiciones reales de operación en planta, se definen las siguientes especificaciones de desempeño como lineamientos clave para el diseño del horno de precalentamiento de bronce. Estas directrices se orientan a garantizar una solución eficiente, segura y práctica, que responda tanto a los objetivos del trabajo como a las necesidades cotidianas del personal operativo.

- **Fuente de calor:** GLP o resistencias eléctricas, priorizando eficiencia y facilidad de implementación.
- **Capacidad térmica:** Alcanzar temperatura de operación en un máximo de 30 minutos desde ambiente.
- **Aislamiento térmico:** Minimizar pérdidas de calor y proteger al operario.
- **Capacidad operativa:** Volumen útil igual o superior a 74,81 litros.
- **Tiempo de carga:** Carga rápida y ajuste ágil previo al encendido.
- **Interfaz operativa:** Uso intuitivo, sin necesidad de formación técnica.
- **Control de temperatura:** Sensor y alerta automática al alcanzar la temperatura objetivo.
- **Presupuesto:** Costo total no mayor a 4000 USD, incluyendo materiales y mano de obra.
- **Mantenimiento:** Fácil acceso para limpieza y mantenimiento.
- **Seguridad:** Aislamiento en zonas críticas, sensores y señalización visual.

## **5.2. Diseño de la estructura mecánica y el sistema de generación de calor para el horno de precalentamiento de bronce.**

Este capítulo describe el proceso de desarrollo conceptual y técnico de la solución propuesta para mejorar el sistema de precalentamiento de bronce en la empresa Remibrass S.A. A través de una secuencia estructurada de fases que abarca la ideación, análisis, selección y diseño detallado en su componente mecánico, se busca traducir las necesidades previamente identificadas en una propuesta coherente y alineada con las condiciones del entorno productivo.

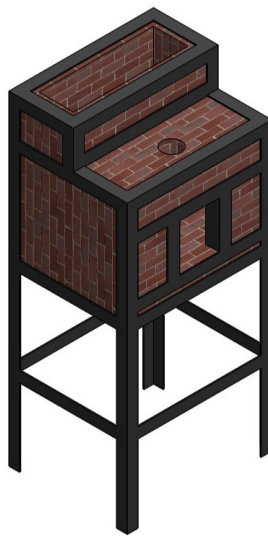
### 5.2.1. Ideación e invención

Esta etapa marca el inicio del proceso creativo en el desarrollo del diseño. La fase de ideación se alimenta tanto de referentes técnicos como de la experiencia práctica observada en planta, lo que permite dar forma a dos conceptos viables de horno: uno que utiliza quemadores a gas GLP como fuente de calor y otro que incorpora resistencias eléctricas. A partir de estas bases, se lleva a cabo un proceso iterativo orientado a definir la propuesta que mejor responda a las especificaciones establecidas.

Con base en lo anteriormente expuesto, se presentan los modelos CAD de los diseños desarrollados, seguidos de sus características principales. Estas propuestas han sido elaboradas atendiendo a los requerimientos establecidos y buscan mejorar el rendimiento del horno. El primer diseño que se considera es una reconstrucción del horno actual, restaurado a su estado original para restablecer sus características de fábrica y funcionalidad, eliminando cualquier signo de desgaste o deterioro.

#### Figura 14

*Diseño 1: Horno restaurado*



**Nota:** Modelo CAD generado a partir de mediciones del horno original en planta.

**Tabla 12**

*Características del Diseño 1: Horno restaurado*

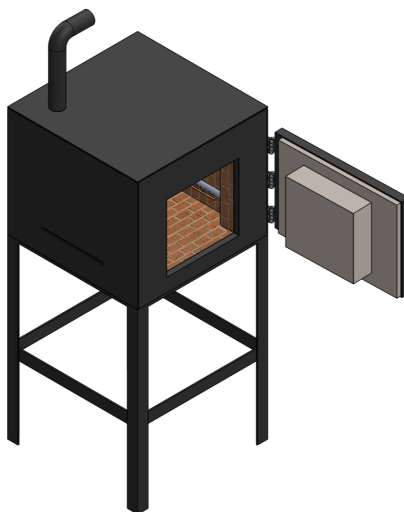
Parámetro	Valor
Dimensiones exteriores	0.672 m × 1.51 m × 0.55 m
Cámara interna	0.532 m × 0.343 m × 0.41 m
Volumen efectivo	74.81 L
Área total de aberturas	0.1354 m <sup>2</sup>
Material estructural	Acero estructural
Aislante térmico	Ladrillo refractario JM 26
Unión refractaria	Mortero refractario
Fuente de calor	Combustión de GLP mediante soplete

**Nota:** El volumen efectivo corresponde al espacio útil para alojar los torchos.

A continuación, se presentan dos variantes diseñadas para quemadores a GLP. Las características de la primera propuesta se detallan a continuación.

**Figura 15**

*Diseño 2: Primer modelo de horno a GLP*



**Nota:** Representación del primer diseño conceptual de horno a GLP.

**Tabla 13**

*Características del Diseño 2: Primer modelo de horno a GLP*

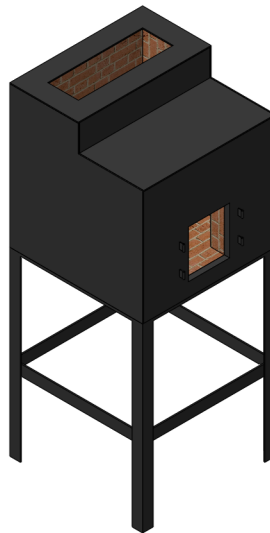
Parámetro	Valor
Dimensiones exteriores	0.63 m × 1.44 m × 0.63 m
Cámara interna	0.45 m × 0.40 m × 0.45 m
Volumen efectivo	81 L
Área total de aberturas	0.1227 m <sup>2</sup>
Material estructural	Acero estructural
Aislante térmico	Ladrillo refractario JM 26
Unión refractaria	Mortero refractario
Aislamiento adicional	Manta térmica
Fuente de calor	Combustión de GLP mediante 4 quemadores tipo flauta

**Nota:** El volumen efectivo corresponde al espacio útil para alojar los torchos.

El siguiente modelo representa el segundo diseño a GLP.

**Figura 16**

*Diseño 3: Segundo modelo de horno a GLP*



**Nota:** Representación del segundo diseño conceptual de horno a GLP.

**Tabla 14**

*Características del Diseño 3: Segundo modelo de horno a GLP*

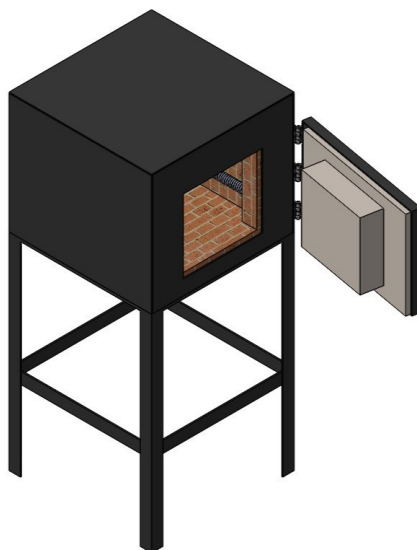
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Dimensiones exteriores	0.63 m × 1.53 m × 0.63 m
Cámara interna	0.45 m × 0.39 m × 0.45 m
Volumen efectivo	78.97 L
Área total de aberturas	0.1092 m <sup>2</sup>
Material estructural	Acero estructural
Aislante térmico	Ladrillo refractario JM 26
Unión refractaria	Mortero refractario
Aislamiento adicional	Manta térmica
Fuente de calor	Combustión de GLP mediante 2 sopletes

**Nota:** El volumen efectivo corresponde al espacio útil para alojar los torchos.

Finalmente, se presentan dos propuestas basadas en resistencias eléctricas.

**Figura 17**

*Diseño 4: Primer modelo de horno eléctrico*



**Nota:** Representación del primer diseño conceptual de horno eléctrico.

**Tabla 15**

*Características del Diseño 4: Primer modelo de horno eléctrico*

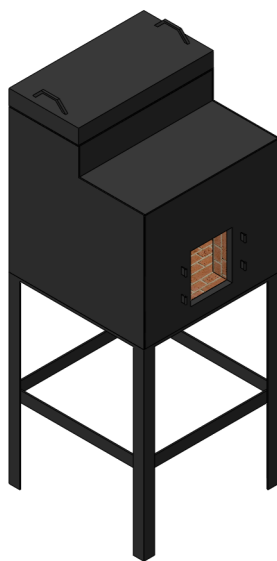
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Dimensiones exteriores	0.63 m × 1.44 m × 0.63 m
Cámara interna	0.45 m × 0.40 m × 0.45 m
Volumen efectivo	81 L
Área total de aberturas	0.1137 m <sup>2</sup>
Material estructural	Acero estructural
Aislante térmico	Ladrillo refractario JM 26
Unión refractaria	Mortero refractario
Aislamiento adicional	Manta térmica
Fuente de calor	4 resistencias eléctricas de Níquel-Cromo

**Nota:** El volumen efectivo corresponde al espacio útil para alojar los torchos.

El siguiente modelo representa el segundo diseño basado en resistencias eléctricas.

**Figura 18**

*Diseño 5: Segundo modelo de horno eléctrico*



**Nota:** Representación del segundo diseño conceptual de horno eléctrico.

**Tabla 16**

*Características del Diseño 5: Segundo modelo de horno eléctrico*

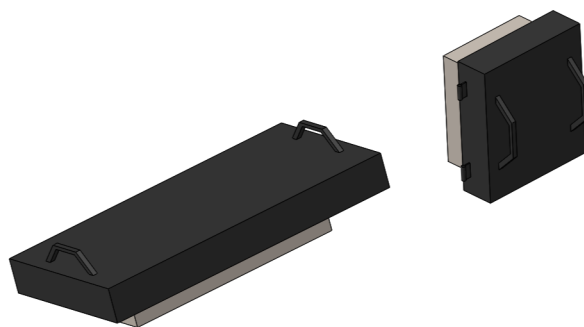
<b>Parámetro</b>	<b>Valor</b>
Dimensiones exteriores	0.63 m × 1.53 m × 0.63 m
Cámara interna	0.45 m × 0.39 m × 0.45 m
Volumen efectivo	78.97 L
Área total de aberturas	0.0439 m <sup>2</sup>
Material estructural	Acero estructural
Aislante térmico	Ladrillo refractario JM 26
Unión refractaria	Mortero refractario
Aislamiento adicional	Manta térmica
Fuente de calor	4 resistencias eléctricas de Níquel-Cromo

**Nota:** El volumen efectivo corresponde al espacio útil para alojar los torchos.

Los diseños 3 y 5 (Figuras 16 y 18) incorporan puertas aislantes removibles que sellan la cámara durante pausas operativas, mejorando la retención térmica. Estos elementos se muestran en la Figura 19.

**Figura 19**

*Puertas extraíbles para sellado térmico*



**Nota:** Solución propuesta para sellar térmicamente la cámara del horno.

A partir de los cinco diseños presentados, se seleccionan, en conjunto con la empresa, los diseños 1, 3 y 5 como modelos a evaluar previo a la selección final.

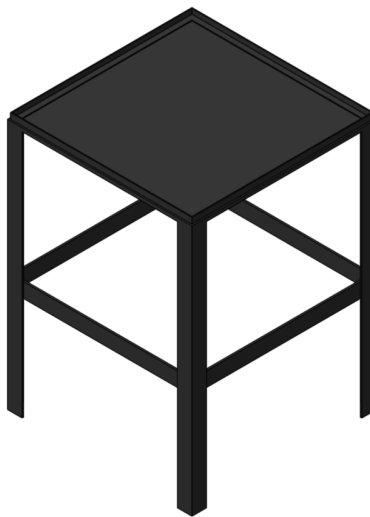
### 5.2.2. Análisis

Una vez definidas las alternativas de diseño, se desarrolla un análisis comparativo centrado en los aspectos esenciales de cada modelo. Dado que el diseño 1 corresponde a una eventual reconstrucción del horno actualmente en operación, y considerando que su fabricación seguiría los mismos criterios ya conocidos por la empresa, esta sección se enfoca en describir las características constructivas y de funcionamiento de los diseños 3 y 5. Se analizan su configuración mecánica, los medios propuestos para la generación de calor y las estimaciones preliminares de pérdida térmica, con el fin de establecer un marco referencial que facilite su evaluación.

Para la estructura del horno se ha optado por acero ASTM A36, por ser una opción adecuada para trabajo en entornos térmicos. El diseño contempla siete piezas estructurales, dimensionadas con base en el horno actualmente en uso y ajustadas a los requerimientos de esta nueva propuesta. Los detalles constructivos se presentan en la sección *Anexos*. La base es el componente principal, pues sobre ella se construye la cámara de calentamiento y se ensamblan las planchas metálicas del cuerpo del horno. La Figura 20 muestra la estructura de la base diseñada.

**Figura 20**

*Vista isométrica de la base.*

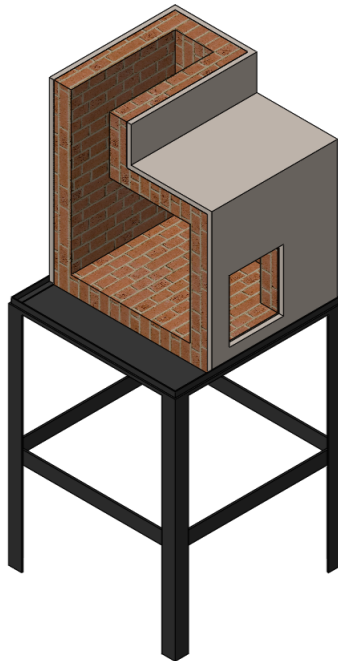


**Nota:** Representación del diseño estructural de la base del horno.

Como primer paso del ensamblaje, sobre la base estructural se construye la cámara de calentamiento con ladrillo refractario y mortero resistente a altas temperaturas. Finalizado este montaje, se recubre externamente con manta cerámica aislante, que actúa como barrera térmica para reducir las pérdidas de calor y proteger la estructura metálica. Este recubrimiento abarca todas las caras internas del horno. La Figura 21 muestra una vista isométrica en corte del horno, donde se aprecia el recubrimiento interno.

### **Figura 21**

*Vista isométrica en corte del horno con recubrimiento interno.*



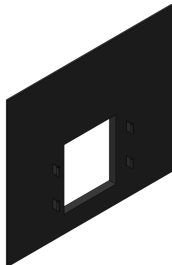
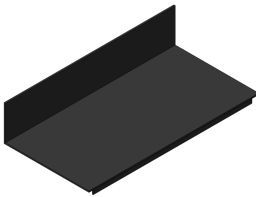
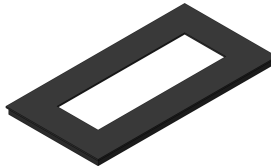


**Nota:** Representación del montaje interno y el sistema de aislamiento térmico del horno.

Finalizado el montaje de la cámara interna, se procede al ensamblaje de las seis piezas restantes que completan la estructura del horno, presentadas en el orden en que deben instalarse sobre la base. Las primeras son las placas laterales, cuya geometría simétrica, una para cada lado, permite iniciar indistintamente con cualquiera. Estas concentran la mayoría de los puntos de fijación para el ensamble de los demás componentes, alcanzando estabilidad estructural al integrarse con la placa posterior. El orden y los detalles específicos de este proceso se resumen en la tabla siguiente.

**Tabla 17**

*Resumen del proceso de ensamblaje de placas estructurales del horno.*

Componente	Descripción del montaje	Figura
Placas laterales	Primeras en instalarse. Sirven de guía para el resto de las placas.	
Placa posterior	Se une a las placas laterales, cierra el conjunto por detrás y aporta rigidez estructural.	
Placa frontal	Fija entre las placas laterales; incluye los soportes para la puerta frontal.	
Placa superior frontal	Cierra la parte frontal superior del horno, después de montar las paredes.	
Placa superior posterior	Última en instalarse; asegura el cierre estructural del cuerpo metálico.	

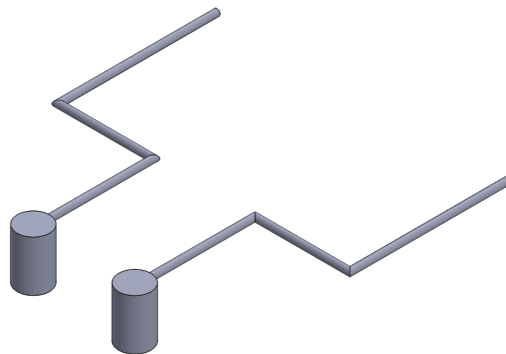
**Nota:** Secuencia de ensamblaje estructural del horno, basada en el modelo CAD desarrollado.

Una vez definida la estructura mecánica del horno, el siguiente elemento clave en cada propuesta corresponde a los mecanismos utilizados para la generación de calor. En esta etapa se identifican y describen los dispositivos incorporados en los diseños 2 y 3, tales como los quemadores de gas y las resistencias eléctricas (niquelinas), considerando su principio de funcionamiento y su integración en la cámara de calentamiento.

El segundo diseño contempla el uso de sopletes comerciales como base para desarrollar quemadores a gas adaptados al modelo propuesto. Esta elección permite aprovechar componentes ya disponibles en el mercado y ajustarlos estructuralmente al horno, con el apoyo del personal técnico de la empresa. Los quemadores operan mediante la mezcla de gas y aire en proporciones adecuadas, generando una llama estable dirigida hacia la cámara. Para garantizar la seguridad y durabilidad del sistema, se instalarán empotrados en las paredes laterales y superior del horno. La Figura 22 presenta el diseño propuesto.

### **Figura 22**

*Quemadores.*



**Nota:** Representación de los quemadores a gas propuestos para el horno.

En el tercer diseño se reemplazan los sopletes por resistencias eléctricas tipo niquelina, dispuestas alrededor del volumen útil del horno para asegurar una distribución uniforme del calor. Estas resistencias convierten la energía eléctrica en calor mediante el efecto Joule y son comúnmente utilizadas en sistemas de precalentamiento por su bajo mantenimiento y facilidad de control. Al igual que en la propuesta anterior, las niquelinas serán empotradas dentro de las paredes de la cámara, protegidas por la estructura de ladrillo, permitiendo un

funcionamiento seguro y eficiente. La Figura 23 ilustra la propuesta.

**Figura 23**

*Niquelina.*



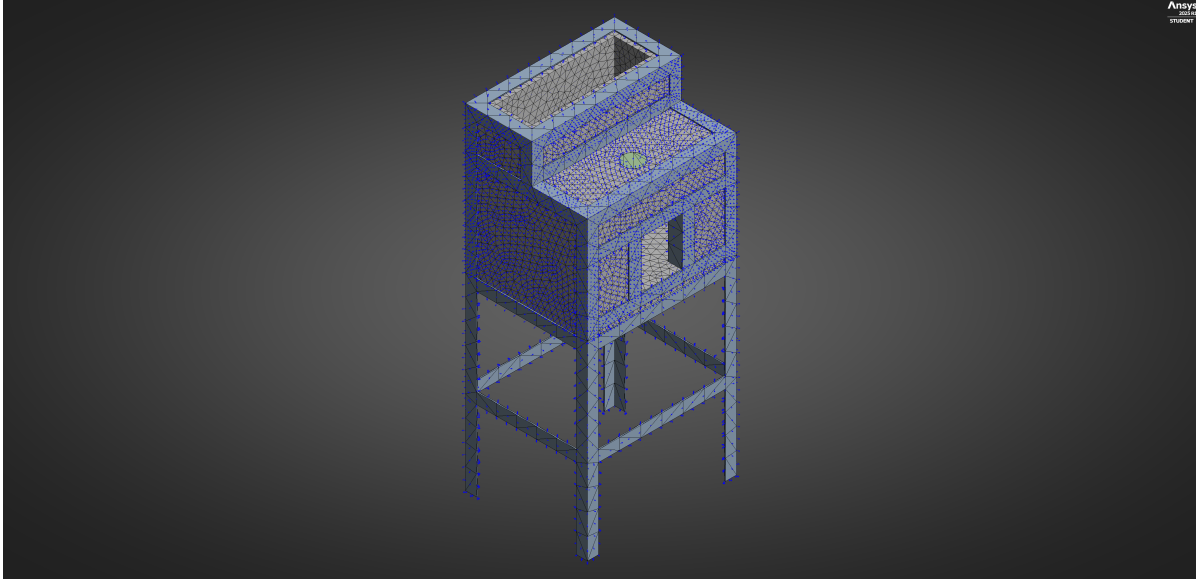
**Nota:** Modelo de una resistencia eléctrica tipo niquelina utilizada en el diseño.

Para evaluar el comportamiento térmico de cada propuesta, se realizan simulaciones numéricas bajo condiciones estandarizadas. Se asume un coeficiente de transferencia de calor por convección de  $h = 5 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para las superficies internas y  $h = 25 \text{ W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}$  para las superficies externas. Estas condiciones permiten comparar las pérdidas de calor a través de las paredes según el diseño y su modo operativo, siendo especialmente notoria la diferencia en el modelo eléctrico, cuya configuración permite mantener la tapa cerrada durante su funcionamiento.

La Figura 24 muestra la distribución del flujo total de calor en el horno actualmente en uso, correspondiente al diseño 1. Se aprecia una dispersión significativa a través de las superficies expuestas. Este modelo presenta pérdidas hacia el ambiente de aproximadamente 1 448.8 W.

## Figura 24

*Distribución del flujo de calor – Diseño 1.*

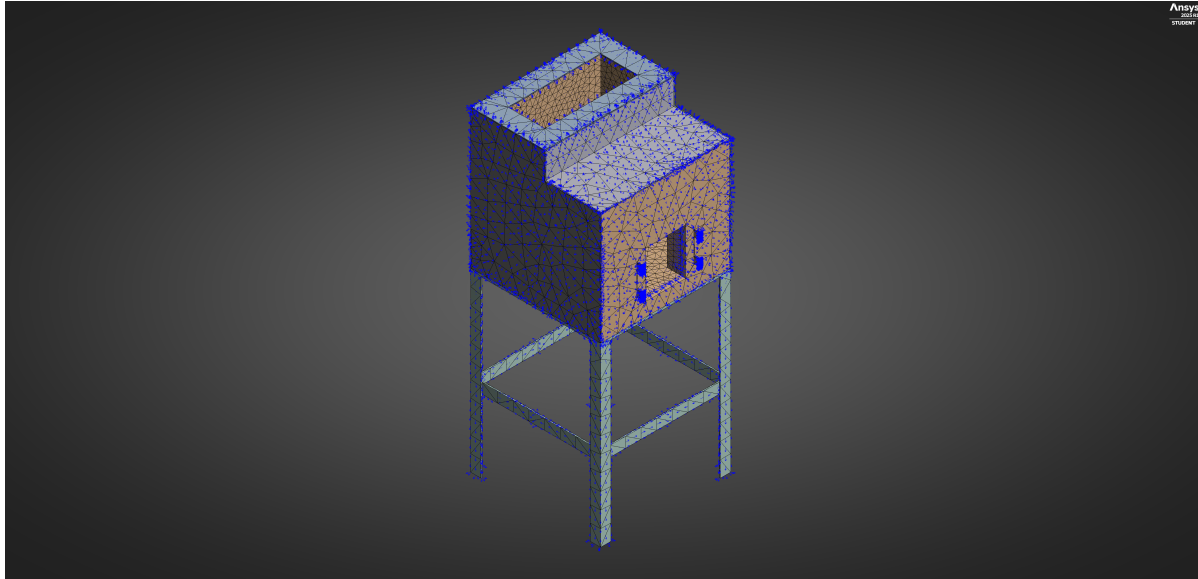


**Nota:** Simulación elaborada mediante el módulo de análisis térmico de ANSYS.

La Figura 25 presenta el resultado correspondiente al segundo diseño, basado en quemadores de gas empotrados. Gracias al aislamiento térmico y al direccionamiento controlado de la llama, las pérdidas hacia el exterior disminuyen considerablemente. Este modelo reporta pérdidas hacia el ambiente de aproximadamente 695.69 W.

## Figura 25

*Distribución del flujo de calor – Diseño 3.*

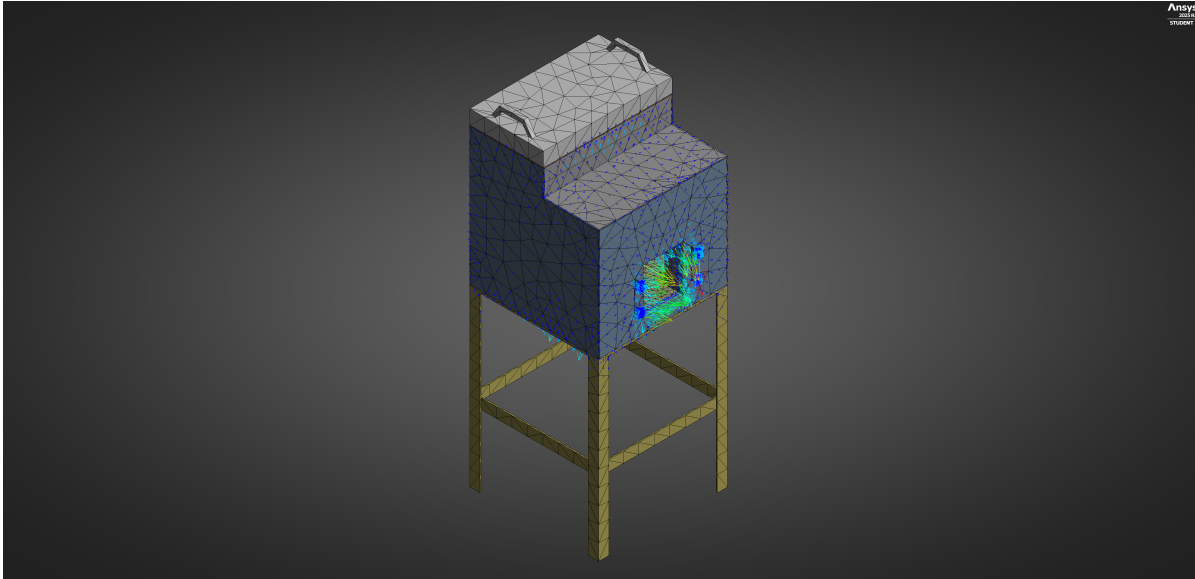


**Nota:** Simulación elaborada mediante el módulo de análisis térmico de ANSYS.

En la Figura 26 se ilustra el comportamiento térmico del modelo eléctrico, que incorpora resistencias de níquel-cromo empotradas. Al operar con la tapa cerrada y sin exposición directa al exterior, este diseño logra reducir al mínimo las pérdidas de calor. Las pérdidas hacia el ambiente estimadas para este modelo son de aproximadamente 328.2 W.

## Figura 26

*Distribución del flujo de calor – Diseño 5.*



**Nota:** Simulación elaborada mediante el módulo de análisis térmico de ANSYS.

### 5.2.3. Selección

Luego del análisis de los tres modelos propuestos, se procede con la etapa de selección para determinar cuál diseño se ajusta mejor a las necesidades de la empresa. Para ello se emplea una matriz de decisión que permite comparar objetivamente los criterios más relevantes. Las ponderaciones asignadas a cada criterio no responden únicamente al juicio del autor, sino que han sido establecidas con base en conversaciones con el personal de la empresa. Esto asegura que la elección final se alinee tanto con criterios técnicos como con las prioridades reales del entorno de trabajo.

Los factores evaluados en la matriz son:

- **Operabilidad:** facilidad de uso y funcionamiento del sistema durante la jornada laboral, garantizando un manejo práctico por parte del operador.
- **Eficiencia térmica:** considera la retención de calor (menores pérdidas energéticas), la velocidad con que se calientan los materiales (torchos) y el tiempo requerido para elevar

la temperatura interna del horno.

- **Construcción:** facilidad técnica para fabricar el diseño. Un valor más alto indica que es más sencillo y rápido de construir.
- **Seguridad:** nivel de riesgo operativo del horno durante su uso, incluyendo exposición a calor o gases, según el tipo de fuente térmica.
- **Costo de construcción:** inversión económica necesaria para fabricar el horno. A menor costo, mayor puntuación asignada.

A continuación, se presenta la matriz de decisión comparativa entre los tres modelos propuestos.

**Tabla 18**

*Matriz de decisión.*

	<b>Operabilidad</b>	<b>Eficiencia térmica</b>	<b>Construcción</b>	<b>Seguridad</b>	<b>Costo Construcción</b>	<b>RANGO</b>
<b>Factor de ponderación</b>	0.2	0.3	0.05	0.25	.20	1.0
Diseño 1	8 1.6	3 0.9	7 0.35	2 0.5	8 1.6	4.95
Diseño 3	8 1.6	8 2.4	4 0.2	4 1	2 0.4	5.6
Diseño 5	8 1.6	5 1.5	6 0.3	8 2	4 0.8	6.20

**Nota:** La tabla muestra la evaluación comparativa de los diseños seleccionados, considerando distintos criterios técnicos y ponderaciones para determinar el diseño más conveniente.

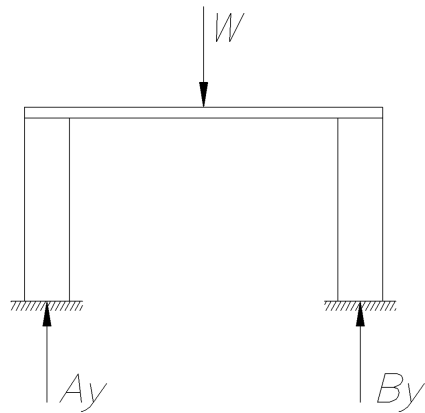
Si bien la evaluación técnica mediante la matriz de decisión posiciona al diseño número 5 (modelo eléctrico) como la opción con mayor puntaje global, en diálogo con la empresa se ha manifestado la preferencia por continuar con el desarrollo del diseño número 3, correspondiente al modelo a gas, decisión que responde a criterios internos y estratégicos definidos por la organización.

#### 5.2.4. Diseño detallado - parte mecánica

Con el fin de asegurar que la estructura del horno soporte adecuadamente tanto el peso de los materiales como las condiciones térmicas durante su operación, se realiza un análisis estructural que combina simulación por elementos finitos y cálculos analíticos. La simulación se enfoca en la estructura completa del horno, mientras que el análisis manual permite estimar el esfuerzo aplicado sobre uno de los pies de apoyo. La Figura 27 ilustra el esquema de cargas distribuidas consideradas para el análisis manual.

#### Figura 27

*Esquema de cargas distribuidas sobre la base del horno.*

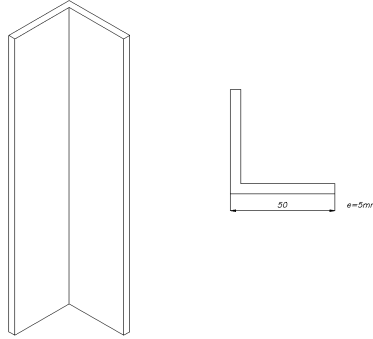


**Nota:** Representación del esquema de cargas consideradas sobre la base del horno.

El perfil estructural utilizado para las patas es un perfil angular en L, cuyas dimensiones y propiedades geométricas fueron obtenidas del catálogo técnico de la empresa DIPAC. La Figura 28 presenta una vista del perfil estructural empleado.

## Figura 28

*Perfil angular tipo L utilizado para el soporte de la estructura.*



**Nota:** Vista del perfil estructural tipo L utilizado como soporte del horno.

Para estimar la fuerza que actúa sobre un solo pie de apoyo, se consideran las masas de los componentes con mayor contribución al peso total: 233,7 kg correspondientes a los ladrillos refractarios, 79,15 kg de las planchas metálicas y 2,65 kg del aislante térmico. Adicionalmente, se incorpora una estimación del peso asociado a las piezas de bronce que serán precalentadas, en función del levantamiento realizado durante las visitas a planta. La carga estimada refleja mejor las condiciones reales del horno, asegurando que el diseño estructural soporte las cargas previstas. A partir de estos valores, se procede con los siguientes cálculos:

$$W = m \cdot g \quad (18)$$

$$W = (233.7 + 79.15 + 2.6592 + 100) \cdot g \text{ N}$$

$$W = 4076.145 \text{ N}$$

Conociendo el peso total del horno, se calcula la carga que actúa sobre cada una de las cuatro patas de apoyo:

$$F_p = \frac{W}{4} \quad (19)$$

$$F_p = 1019.036 \text{ N}$$

Para determinar el esfuerzo generado por esta carga en una sola pata, se utiliza el valor del área de su sección transversal:

$$A = 0.000454 \text{ m}^2$$

$$\sigma = \frac{F_p}{A} \quad (20)$$

$$\sigma = -2.2445 \text{ MPa}$$

Considerando que el horno opera en un entorno térmico activo, se evalúa un escenario en el que la base metálica alcanza una temperatura de hasta 80 °C, a fin de estimar el esfuerzo térmico generado por el incremento de temperatura:

$$\sigma_{\text{térmica}} = -E \cdot \alpha \cdot \Delta T \quad (21)$$

$$\sigma_{\text{térmica}} = -129.25 \text{ MPa}$$

El esfuerzo total en uno de los pies de apoyo se determina como la suma de los esfuerzos mecánico y térmico, ambos de signo negativo al representar estados de compresión debido a que la base se encuentra fija en sus extremos. De esta forma, se verifica que la magnitud resultante no supere el límite de fluencia del material.

$$\sigma_{\text{total}} = \sigma_{\text{mecánica}} + \sigma_{\text{térmica}} \quad (22)$$

$$\sigma_{\text{total}} = 131.494 \text{ MPa}$$

$$\sigma_{\text{total}} < 250 \text{ MPa}$$

Con el fin de complementar esta verificación, se calcula el factor de seguridad como el cociente entre el límite de fluencia del acero ASTM A36 y el esfuerzo total determinado:

$$\text{FS} = \frac{\sigma_{\text{fluencia}}}{\sigma_{\text{total}}} = \frac{250 \text{ MPa}}{131.494 \text{ MPa}} \approx 1,90 \quad (23)$$

Adicionalmente, se calcula la deformación axial total generada en uno de los pies de apoyo

debido a la carga mecánica aplicada:

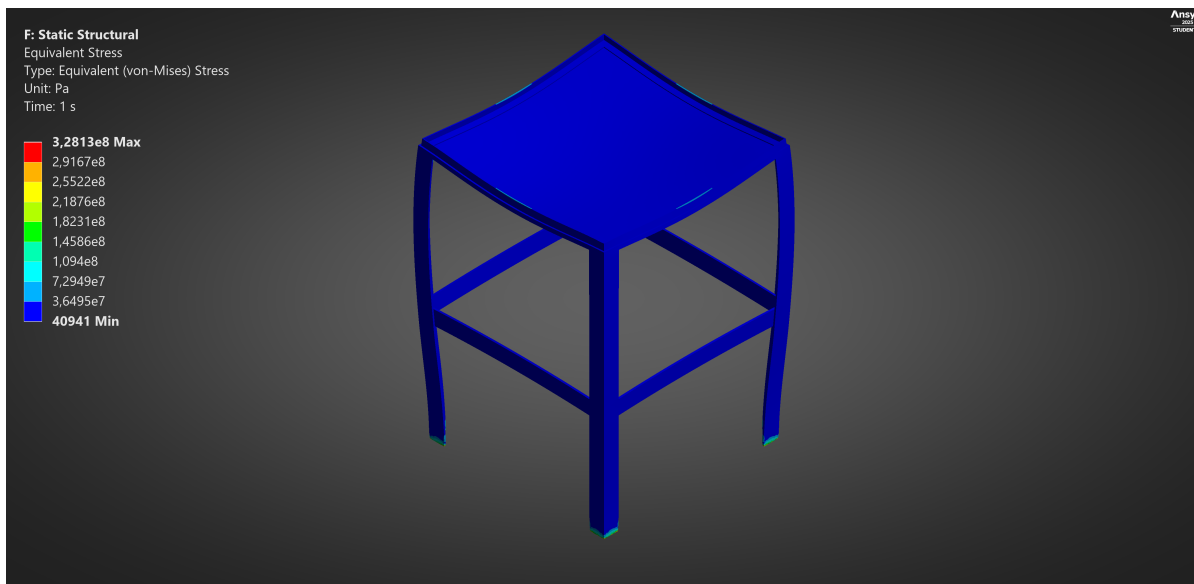
$$\delta_{\text{mecánica}} = \frac{F_p \cdot L}{A \cdot E} \quad (24)$$

$$\delta_{\text{mecánica}} = 10.1242 \mu\text{m}$$

Por su parte, la simulación estructural de la base completa permite visualizar el comportamiento general del conjunto bajo las condiciones de carga. Se confirma que tanto las deformaciones como los esfuerzos se mantienen dentro de límites seguros, garantizando la integridad del diseño. Las Figuras 29 y 30 muestran los resultados obtenidos.

### Figura 29

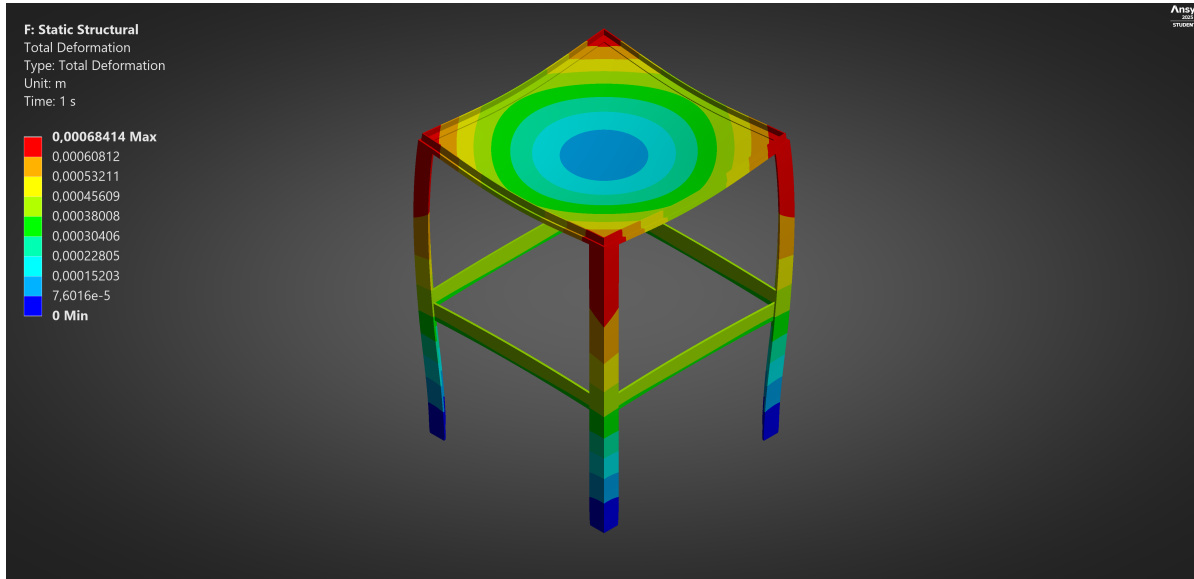
*Esfuerzo máximo de la base.*



**Nota:** Se observa la distribución del esfuerzo equivalente.

**Figura 30**

*Deformación máxima de la base.*



**Nota:** Se muestra la deformación total en la estructura.

Verificada la resistencia estructural frente a las cargas mecánicas y térmicas, el diseño continúa con el dimensionamiento energético necesario para una operación segura. En este sentido, resulta fundamental asegurar un suministro continuo y seguro de combustible. Por tal motivo, se estima el caudal másico máximo de extracción de GLP que puede mantenerse sin riesgo de congelamiento del cilindro. El análisis se basa en el equilibrio energético entre el calor que el cilindro capta del ambiente por convección y el calor requerido para la vaporización del combustible, aplicando el principio de conservación de la energía.

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \cdot A \cdot (T_{\infty} - T_{\text{cil}}) \quad (25)$$

En donde:

$h$	= Coeficiente de transferencia de calor	[W/m <sup>2</sup> °C]
$A$	= Área lateral del cilindro	[m <sup>2</sup> ]
$T_{\infty}$	= Temperatura ambiente	[°C]
$T_{\text{cil}}$	= Temperatura de la superficie del cilindro.	[°C]

Para determinar el caudal másico máximo, se calcula el calor latente de vaporización ( $h_{fg}$ ) de la mezcla 70% propano y 30% butano, mediante un promedio ponderado:

$$h_{fg} = 0.7 \cdot (427,8 \text{ kJ/kg}) + 0.3 \cdot (385,2 \text{ kJ/kg})$$

$$h_{fg} = 415,02 \text{ kJ/kg}$$

Con este valor, y a partir de la ecuación 26, se despeja el caudal másico máximo  $\dot{m}_{\max}$ , que corresponde al límite de extracción sin riesgo de congelamiento:

$$Q_{\text{conv}} = \dot{m}_{\max} \cdot h_{fg} \quad (26)$$

$$\dot{m}_{\max} = 0,886 \text{ kg/h}$$

A partir del valor obtenido para el caudal másico, se aplica un factor de seguridad del 10% con el fin de asegurar una operación térmica confiable. Con este nuevo valor reducido, se calcula el volumen de aire requerido para una combustión estequiométrica completa. El análisis se realiza sobre el caudal en gramos por hora, y utiliza como referencia las fórmulas químicas de los principales componentes del GLP:  $C_3H_8$  y  $C_4H_{10}$ .

$$\dot{m}_{\text{GLP}} = 797,4 \text{ g/h}$$

$$\dot{m}_{C_3H_8} = 0,70 \cdot 797,4 = 558,18 \text{ g/h}$$

$$\dot{m}_{C_4H_{10}} = 0,30 \cdot 797,4 = 239,22 \text{ g/h}$$

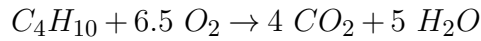
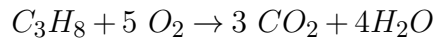
Con estas fracciones másicas, se convierte la masa de cada componente en cantidad de sustancia, expresada en moles ( $n$ ):

$$n_{C_3H_8} = \frac{620,2}{44,1} = 12,657 \text{ mol/h} \quad (27)$$

$$n_{C_4H_{10}} = \frac{239,22}{58,12} = 4,116 \text{ mol/h} \quad (28)$$

A continuación, se presentan las ecuaciones químicas balanceadas para la combustión

completa del propano y del butano:



Con base en estos coeficientes estequiométricos, se determina la cantidad total de oxígeno necesaria para la combustión:

$$n_{O_2, C_3H_8} = 12,657 \cdot 5 = 63,285 \text{ mol/h}$$

$$n_{O_2, C_4H_{10}} = 4,116 \cdot 6,5 = 26,754 \text{ mol/h}$$

$$n_{O_2, total} = 63,285 + 26,754 = 90,039 \text{ mol/h}$$

Dado que el aire contiene aproximadamente un 21% de oxígeno en volumen (fracción molar), se calcula el caudal total de aire requerido:

$$n_{\text{aire}} = \frac{n_{O_2, total}}{y_{O_2, \text{aire}}} = \frac{90,039 \text{ mol/h}}{0.21} = 428.757 \text{ mol/h de aire}$$

Finalmente, se aplica la ley de los gases ideales para determinar el volumen de aire necesario:

$$V_{\text{aire}} = \frac{n_{\text{aire}} \cdot R \cdot T}{P}$$

$$V_{\text{aire}} = \frac{428.757 \text{ mol/h} \times 0,08205 \text{ atm} \cdot \text{L}/(\text{mol} \cdot \text{K}) \times 294.4 \text{ K}}{1 \text{ atm}}$$

$$V_{\text{aire}} \approx 10.356 \text{ m}^3/\text{h}$$

Con el volumen de aire estequiométrico calculado, se evalúa ahora si las aberturas del horno permiten una admisión suficiente para sostener la combustión. Cabe señalar que, en aplicaciones reales, se proporciona un exceso de aire como margen de seguridad, a fin de asegurar la combustión completa y compensar posibles variaciones en las condiciones de operación y en la mezcla del combustible.

Para determinar la capacidad real de entrada de aire en el diseño propuesto, se lleva a cabo un análisis de tiro natural. Este estudio permite cuantificar el flujo de aire ambiente que ingresa por la abertura frontal. La evaluación consideran la diferencia de densidad entre los gases calientes internos y el aire frío ambiental, que impulsa el flujo sin asistencia mecánica. Los parámetros clave utilizados en este análisis son:

- **Caudal másico de GLP ( $\dot{m}_{\text{GLP}}$ ):** 0.7974 kg/h
- **Presión Atmosférica ( $P$ ):** 1 atm
- **Temperatura Ambiente ( $T_{\text{ambiente}}$ ):** 21.25°C
- **Temperatura Promedio de los Gases en el Horno ( $T_{\text{gases\_horno}}$ ):** 111.55°C
- **Dimensiones de la Abertura Frontal:** 0.225 m × 0.195 m
- **Altura Efectiva del Horno ( $H_{\text{horno}}$ ):** 0.4925 m
- **Coefficiente de Descarga ( $C_d$ ):** 0.65
- **Aceleración de la Gravedad ( $g$ ):** 9.81 m/s<sup>2</sup>
- **Constante Específica del Aire ( $R_{\text{aire}}$ ):** 287 J/(kg · K)

El cálculo del caudal de aire por tiro natural se fundamenta en la determinación de la presión de tiro generada ( $\Delta P_{\text{tiro}}$ ) y el caudal volumétrico resultante ( $\dot{V}_{\text{aire,tiro}}$ ). La presión de tiro, que es la fuerza impulsora, se calcula a partir de las densidades del aire ambiente y los gases calientes del horno, y la altura efectiva, tal como se indica en la ecuación 29.

$$\Delta P_{\text{tiro}} = (\rho_{\text{aire\_ambiente}} - \rho_{\text{gases\_horno}}) \cdot g \cdot H_{\text{horno}} \quad (29)$$

Donde las densidades ( $\rho$ ) se derivan de la ley de los gases ideales ( $P/(R_{\text{aire}} \cdot T)$ ).

Una vez determinada la presión de tiro, el caudal volumétrico de aire que ingresa por la abertura frontal se calcula como:

$$V_{\text{aire,tiro}} = C_d \cdot A_{\text{frontal}} \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta P_{\text{tiro}}}{\rho_{\text{aire\_ambiente}}}} \quad (30)$$

De esta manera, por la abertura frontal del horno ingresa un caudal de 154.69 m<sup>3</sup>/h, equivalente a un exceso del 1392% respecto al aire estequiométrico requerido. Esta significativa entrada de aire responde a la necesidad operativa de mantener la abertura libre de cerramientos, lo cual permite la manipulación continua del bronce durante el proceso. Considerando esta condición, el diseño prioriza la eficiencia mediante un recubrimiento refractario que mejore la retención de calor y un sistema de control que permita regular adecuadamente el desempeño térmico del horno.

### **5.3. Diseño de un sistema de control para monitorear la temperatura durante el proceso de precalentamiento de bronce.**

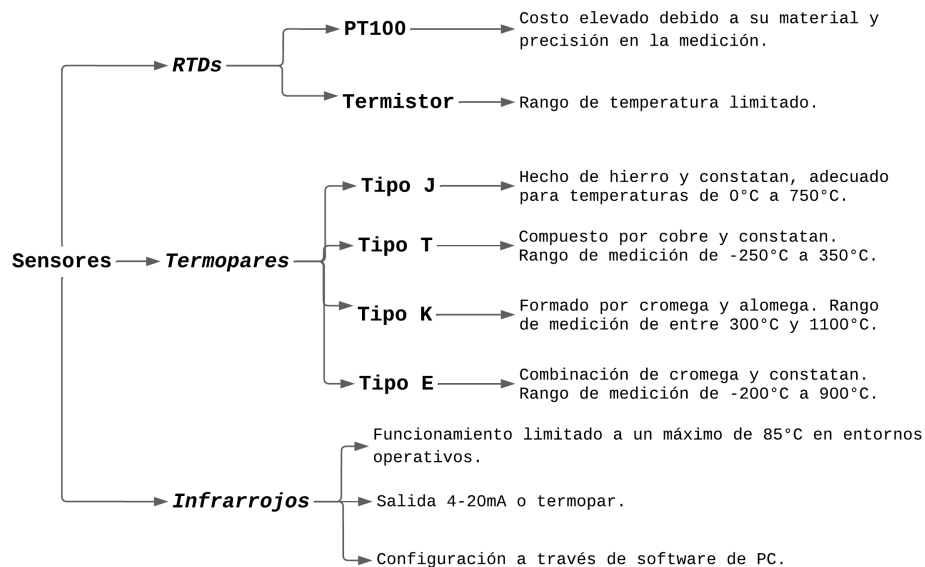
Con base en la selección del modelo a gas como alternativa preferente por parte de la empresa, este capítulo completa el proceso de diseño detallado abordando el sistema de control. El desarrollo se enfoca en establecer una solución que permita supervisar y regular el comportamiento térmico del horno durante el precalentamiento, asegurando un funcionamiento seguro, estable y alineado con los parámetros operativos identificados durante el levantamiento de información.

#### **5.3.1. Diseño detallado - parte de control**

Como parte del sistema de control, uno de los elementos más críticos es la medición de temperatura dentro del horno, ya que permite tomar decisiones automáticas sobre la alimentación de combustible y la activación de alarmas. En función de esto, se analiza una serie de opciones de sensores con el objetivo de identificar la alternativa más adecuada para las condiciones del horno. La figura 31 presenta un árbol de decisión que resume las principales alternativas disponibles y sus características generales.

**Figura 31**

*Árbol de decisión para la selección del sensor de temperatura.*



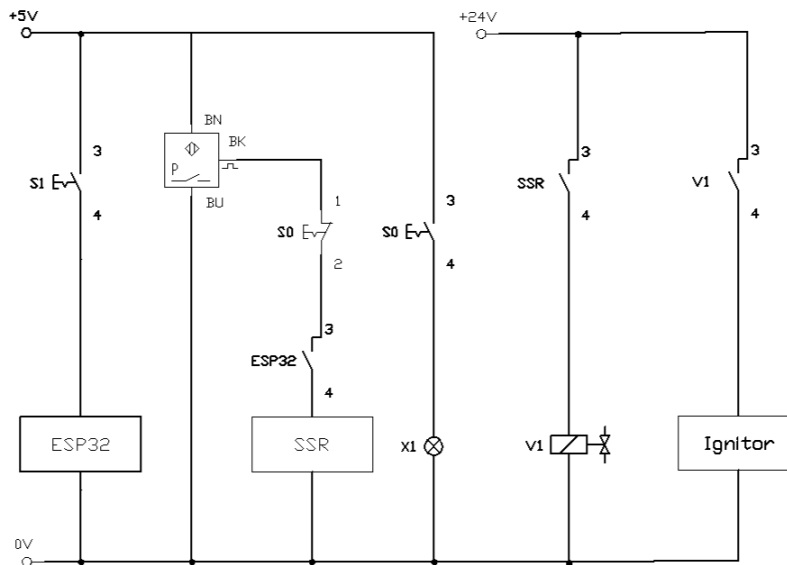
**Nota:** Tomado de SRC Solution. (s.f.). Tipos de sensores de temperatura. <https://srsl.com/tipos-sensores-temperatura/>

Como resultado de este análisis, se selecciona la termocupla tipo K debido a su versatilidad, amplio rango de medición, bajo costo relativo y disponibilidad en el mercado local. A partir de esta decisión, se establece la arquitectura de control necesaria para regular el sistema térmico en torno a los 120,°C. La figura 32 presenta el esquema de mando y fuerza propuesto, en el que se estructura la lógica de operación eléctrica del horno.

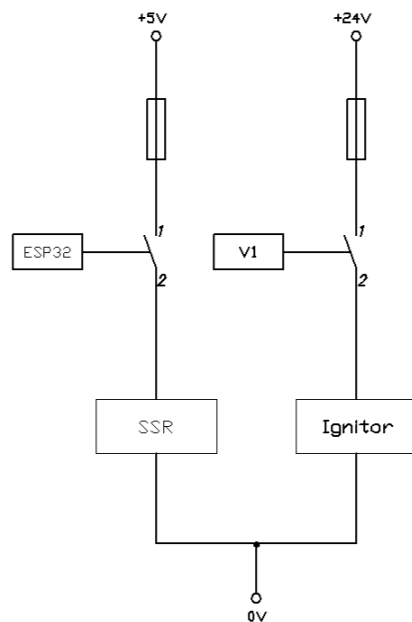
## Figura 32

Esquema de mando y fuerza.

Esquema de mando



Esquema de Fuerza

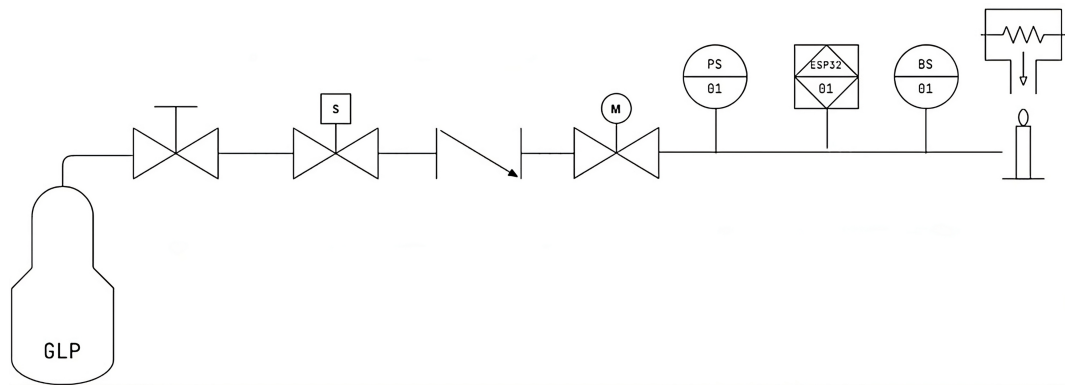


**Nota:** Boceto referencial sujeto a ajustes en una etapa de implementación.

Al controlar un sistema a gas, se presenta también el diagrama de tuberías, necesario para entender los elementos presentes en el proceso de combustión y el tipo de válvulas a utilizar para llevar a cabo el procedimiento.

**Figura 33**

*Diagrama P&ID.*

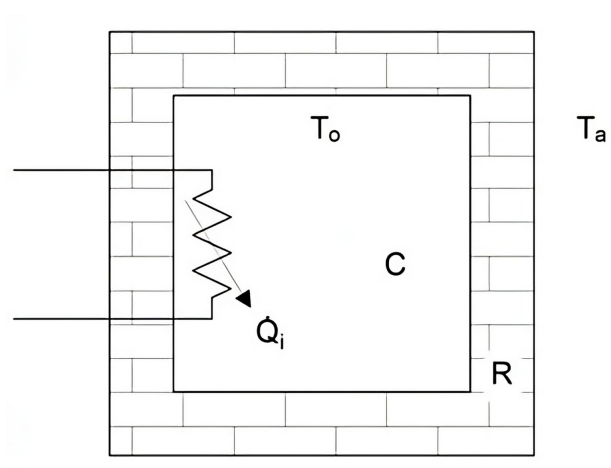


**Nota:** Configuración de válvulas y dispositivos presentes en el proceso de combustión.

Bajo este criterio, se requiere un sistema de control que regule la temperatura interior, a partir de la función de transferencia derivada del esquema de la figura 34.

**Figura 34**

*Esquema representativo del horno.*



**Nota:** Tomado de Jaramillo y Peralta (2022), p. 52.

Los componentes de un sistema térmico pueden ser representados mediante elementos eléctricos, lo cual simplifica la formulación de un modelo matemático que describa su comportamiento. De esta manera, se establece la siguiente correspondencia:

Fuente de calor ( $\dot{Q}_i$ )  $\rightarrow$  Fuente de corriente  
 Capacitancia térmica ( $C$ )  $\rightarrow$  Capacitor  
 Resistencia térmica ( $R$ )  $\rightarrow$  Resistencia eléctrica  
 Temperatura interior ( $T_0$ )  $\rightarrow$  Voltaje  
 Temperatura ambiente ( $T_a$ )  $\rightarrow$  Voltaje

En donde siguiendo el planteamiento descrito por Jaramillo y Peralta se llega a la función de transferencia de primer orden que representa el comportamiento del sistema en lazo abierto:

$$\frac{T_o(S)}{Q_i(S)} = \frac{R}{R \cdot C \cdot S + 1} \quad (31)$$

Considerando que el valor de la resistencia depende de las propiedades de los materiales que conforman las paredes, y que la capacitancia está determinada por el medio contenido en el horno, en este caso, el aire, se establece lo siguiente:

$$R = \frac{1}{K_{Ladrillo}} + \frac{1}{K_{Refractario}} + \frac{1}{K_{Acero}} \quad (32)$$

$$R = \frac{1}{1.3} + \frac{1}{0.22} + \frac{1}{60.5}$$

$$R = 5.3147$$

$$C = m \cdot c \quad (27)$$

$$C = 0.099891 \cdot 1007$$

$$C = 100.5902$$

Donde:

$K$ = Conductividad térmica del material	$[W/mK]$
$m$ = Masa de aire contenida dentro del horno	$[kg]$
$c$ = Calor específico del aire a temperatura ambiente	$[J/kgK]$

De esta forma, se obtiene la siguiente función de transferencia que describe el comportamiento del horno:

$$G(s) = \frac{5.3147}{534.6067s + 1} \quad (33)$$

Para estimar el tiempo de establecimiento del sistema, se recurre a la fórmula propuesta por Norman S. Nise en su libro *Control Systems Engineering*, la cual relaciona directamente este parámetro con la constante de tiempo  $\tau$  del sistema:

$$T_s = 4\tau \quad (34)$$

En este caso, con  $\tau = 534.6067$ , el tiempo de establecimiento resulta:

$$T_s = 2138.43s$$

Asimismo, se evalúa el error en estado estacionario ante una entrada escalón unitario, utilizando el criterio de tipo sistema y ganancia estática. La fórmula correspondiente es:

$$e(\infty) = e_{\text{step}}(\infty) = \lim_{s \rightarrow 0} \frac{s(1/s)}{1 + G(s)} = \frac{1}{1 + \lim_{s \rightarrow 0} G(s)} \quad (35)$$

Aplicando esta expresión a la planta del sistema, se obtiene:

$$e_{ss} = 0.1584$$

En consecuencia, el sistema actual presenta un tiempo de asentamiento de aproximadamente 2138.43 segundos y un error en estado estacionario del 15.84 %. Para mejorar estos indicadores, se propone una estrategia de control que mantenga la temperatura dentro de un margen de  $\pm 10$  °C respecto al valor de consigna, tanto en el régimen transitorio como en estado estable. Se selecciona un controlador PI, ya que elimina el error en estado estacionario y mejora la respuesta transitoria. A diferencia de un controlador P o PD, el PI corrige desviaciones sostenidas y, frente al PID, evita una acción derivativa innecesaria para este tipo de proceso

térmico.

Para el diseño del controlador PI, se establece como criterio de desempeño un overshoot del 2% y un tiempo de asentamiento de 1500 segundos. Estos valores buscan un equilibrio entre rapidez, precisión y estabilidad térmica, respetando el margen deseado de  $\pm 10$  °C. A partir de estos requerimientos, se modela el sistema en lazo cerrado combinando la función de transferencia del horno (Ecuación 33) con la del controlador (Ecuación 36).

$$G_c(s) = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (36)$$

$$G_{LC}(s) = \frac{G(s) \cdot G_c(s)}{1 + G(s) \cdot G_c(s)} \quad (37)$$

$$G_{LC}(s) = \frac{5.3147(K_p s + K_i)}{534.6067s^2 + (1 + 5.3147K_p)s + 5.3147K_i} \quad (38)$$

Al igualar el denominador de la función de transferencia resultante con la forma estándar de un sistema de segundo orden (Ecuación 39), se obtienen las expresiones necesarias para calcular  $K_p$  y  $K_i$ .

$$G_{std}(s) = \frac{\omega_n^2}{s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2} \quad (39)$$

Se normaliza el denominador de la ecuación 38 dividiendo por 534.6067 para que el coeficiente de  $s^2$  sea 1, y se igualan los denominadores:

$$s^2 + \frac{1 + 5.3147K_p}{534.6067}s + \frac{5.3147K_i}{534.6067} = s^2 + 2\zeta\omega_n s + \omega_n^2$$

De esta manera:

$$\frac{1 + 5.3147K_p}{534.6067} = 2\zeta\omega_n$$

$$\frac{5.3147K_i}{534.6067} = \omega_n^2$$

Los valores finales calculados son:

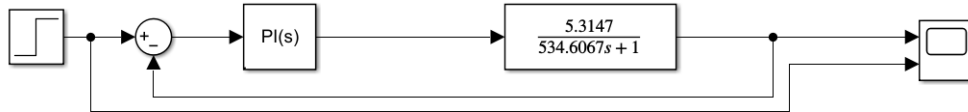
$$K_p = 0.3395$$

$$K_i = 0.0011$$

La implementación de estos parámetros en *Simulink* se ilustra en la figura 35.

**Figura 35**

*Implementación del controlador PI en Simulink.*

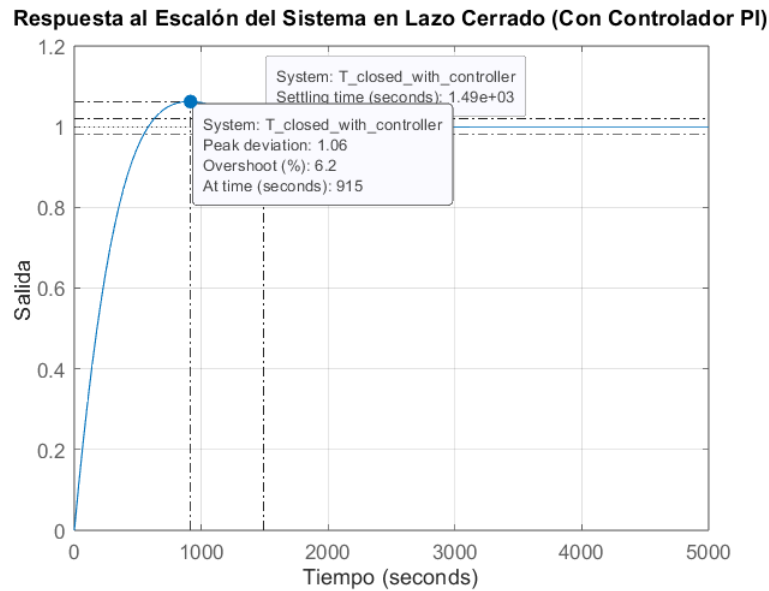


**Nota:** El esquema ilustra la configuración del lazo de control.

El comportamiento resultante del sistema en lazo cerrado se presenta en la figura 36:

**Figura 36**

*Respuesta al escalón del sistema con controlador PI.*



**Nota:** Representa la dinámica del sistema bajo la acción del controlador PI.

A partir del diseño analítico se obtiene una respuesta del sistema que cumple con los criterios definidos, manteniendo la temperatura dentro del margen de tolerancia de  $\pm 10$  °C respecto al valor de referencia. No obstante, se observa que el overshoot excede el valor

teórico deseado del 2%, esperado en una respuesta subamortiguada óptima, lo cual, si bien no compromete la estabilidad ni la funcionalidad del controlador, deja abierta la posibilidad de mejorar su desempeño. En este escenario, se recurre al asistente *PID Tuner* como una herramienta complementaria para ajustar finamente los parámetros del controlador.

Esta intervención no reemplaza el diseño inicial, sino que actúa como un respaldo para refinar la respuesta del sistema sin perder la base técnica construida. Como resultado, se obtiene una mejora notable en la dinámica del sistema, con un overshoot reducido y una mejor adaptación a la referencia. El *PID Tuner* sugiere, en este caso, los nuevos parámetros  $K_p$  y  $K_i$ , los cuales serán utilizados en las siguientes simulaciones del presente trabajo.

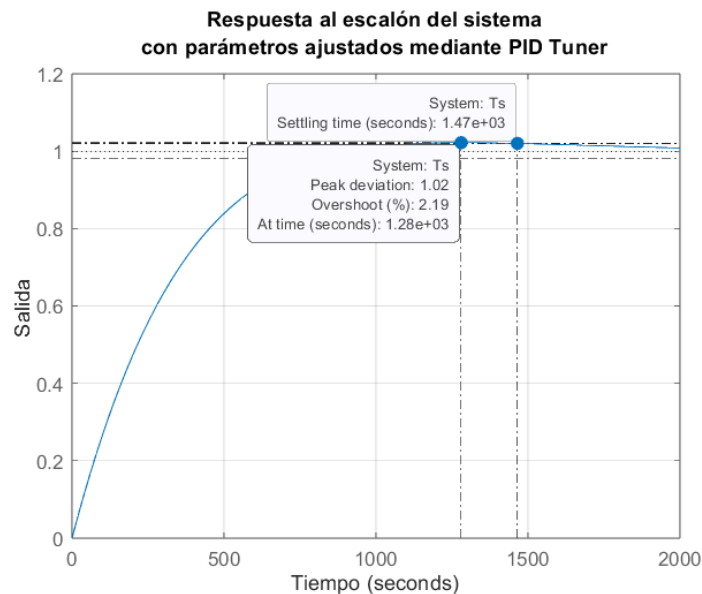
$$K_p = 0.3013$$

$$K_i = 7.566 \cdot 10^{-4}$$

A continuación, se presenta la respuesta del sistema al aplicar los parámetros sugeridos, con el objetivo de observar su desempeño frente a una entrada escalón.

**Figura 37**

*Respuesta del sistema con parámetros ajustados mediante PID Tuner.*



**Nota:** Se observa una disminución del sobreimpulso respecto al diseño inicial, manteniendo el mismo tiempo de establecimiento.

Una vez definidos los parámetros del sistema en su forma continua, se debe llevar este modelo al dominio discreto, ya que la implementación final se realizará sobre un microcontrolador ESP32 que opera con señales digitales. Para este proceso se define un tiempo de muestreo de 5 segundos, basado en lo indicado por Jaramillo y Peralta (2018), quienes mencionan que ese es el tiempo promedio que tarda una termocupla tipo K en entregar una lectura estable. Este intervalo está dentro de las capacidades del ESP32, cuya velocidad de adquisición garantiza un procesamiento confiable en ese periodo.

Para obtener las funciones discretas del sistema y del controlador PI se emplea el método de retención de orden cero (ZOH), que permite transformar funciones de transferencia del dominio continuo  $s$  al dominio discreto  $z$ . Este método asume que la señal de entrada se mantiene constante durante cada intervalo de muestreo, lo que permite derivar una expresión formal para la discretización de sistemas. La ecuación que representa este procedimiento es:

$$G(z) = \mathcal{Z} \left\{ \mathcal{L}^{-1} \left[ G(s) \cdot \frac{1 - e^{-sT_s}}{s} \right] \Big|_{t=kT_s} \right\} \quad (40)$$

A partir de la expresión mostrada en la ecuación 40, se discretizan las funciones de transferencia continua de la planta y del controlador PI, representadas previamente en las ecuaciones 33 y 36. Usando los valores establecidos para  $K_p$  y  $K_i$ , se obtienen las siguientes funciones en el dominio discreto. Para la planta:

$$G(z) = \frac{0.04947}{z - 0.9907} \quad (41)$$

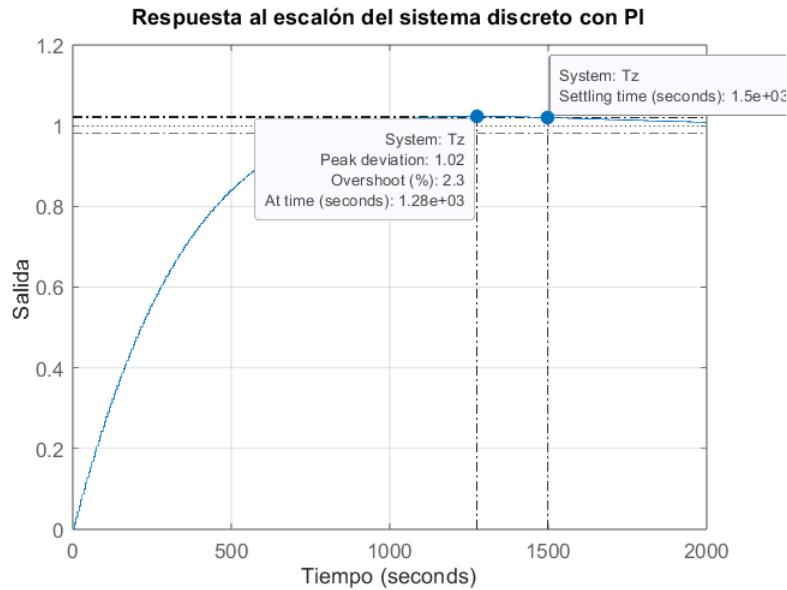
Y para el controlador:

$$G_c(z) = \frac{0.3013z - 0.2975}{z - 1} \quad (42)$$

Una vez obtenidas las funciones de transferencia en el dominio  $z$ , se procede a analizar el comportamiento dinámico del sistema mediante su respuesta a una entrada escalón unitario. Esta simulación permite evaluar el desempeño del controlador PI digital aplicado sobre la planta discretizada.

**Figura 38**

*Respuesta al escalón unitario del sistema discretizado.*

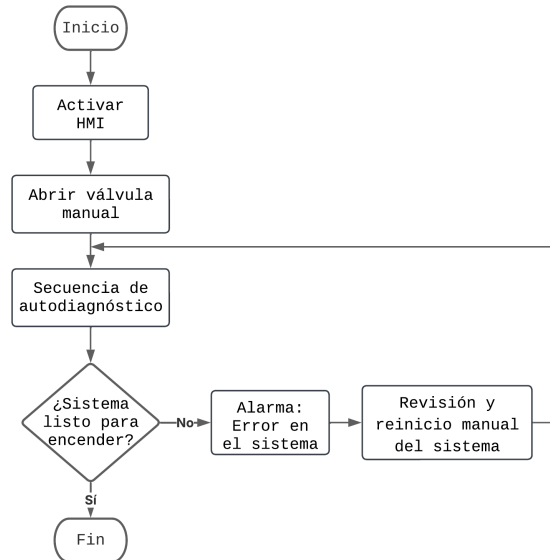


**Nota:** La representación gráfica corresponde a una simulación de 2000 segundos, por lo que los intervalos de muestreo aparecen visualmente continuos. Sin embargo, el sistema opera en dominio discreto con un tiempo de muestreo constante.

Con el modelo ya discretizado, el siguiente paso para su implementación en el microcontrolador es formular la ecuación en diferencias y desarrollar la programación necesaria. Si bien este trabajo no profundiza en la etapa de codificación, se expone la lógica operativa mediante diagramas de flujo que describen la secuencia de arranque, calentamiento y operación continua del sistema. La figura 39 muestra la primera parte de esta lógica, donde se verifica el estado de los componentes y se habilita el encendido del sistema de combustión.

**Figura 39**

*Diagrama de flujo de encendido del sistema.*

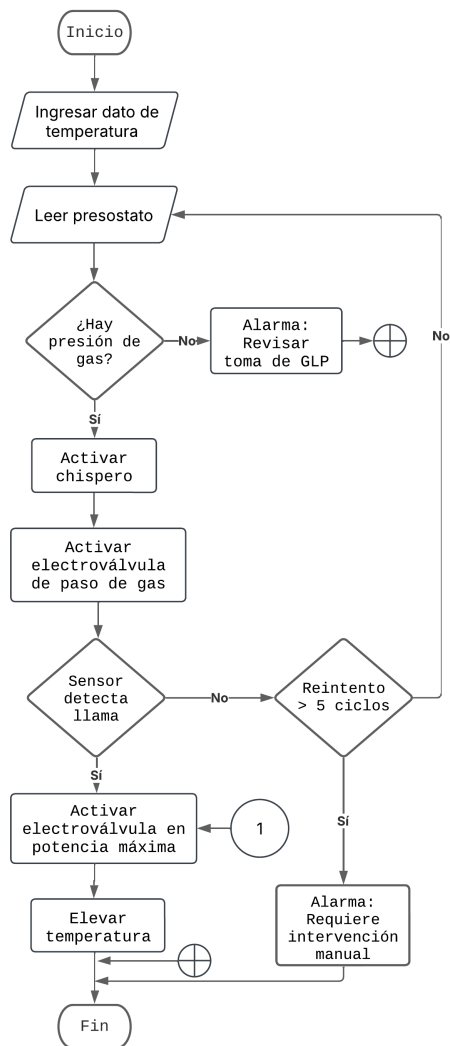


**Nota:** Define la lógica de verificación y habilitación antes del arranque del proceso.

Como parte de la secuencia de encendido, el sistema ejecuta una etapa de autodiagnóstico que garantiza condiciones seguras para el arranque. En esta fase se verifica la presión de gas, el estado funcional de las termocuplas, que el botón de emergencia no esté activado y que las electroválvulas de gas permanezcan inicialmente cerradas. Solo al cumplirse todas estas condiciones, se habilita la apertura controlada de válvulas y el posterior encendido de los quemadores. Una vez superada esta validación inicial, la figura 40 detalla el procedimiento de encendido de quemadores y la gestión del proceso de calentamiento del horno.

**Figura 40**

*Diagrama de flujo para la fase de calentamiento.*

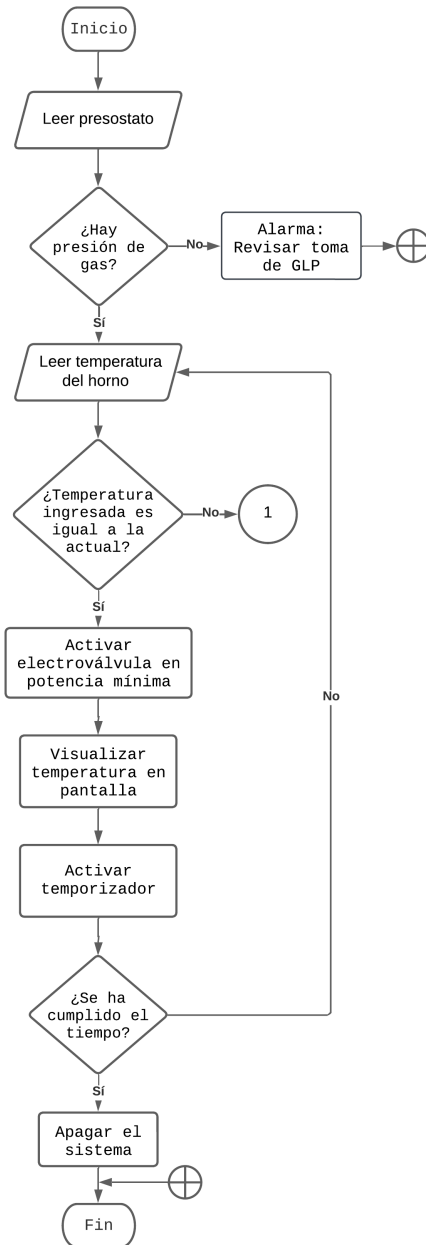


**Nota:** Establece la secuencia de control durante el encendido y regulación térmica inicial.

Finalmente, la figura 43 ilustra la lógica de trabajo continuo, en la que se mantiene la temperatura dentro de los parámetros definidos mediante regulación automática.

**Figura 41**

*Diagrama de flujo de operación continua del horno.*



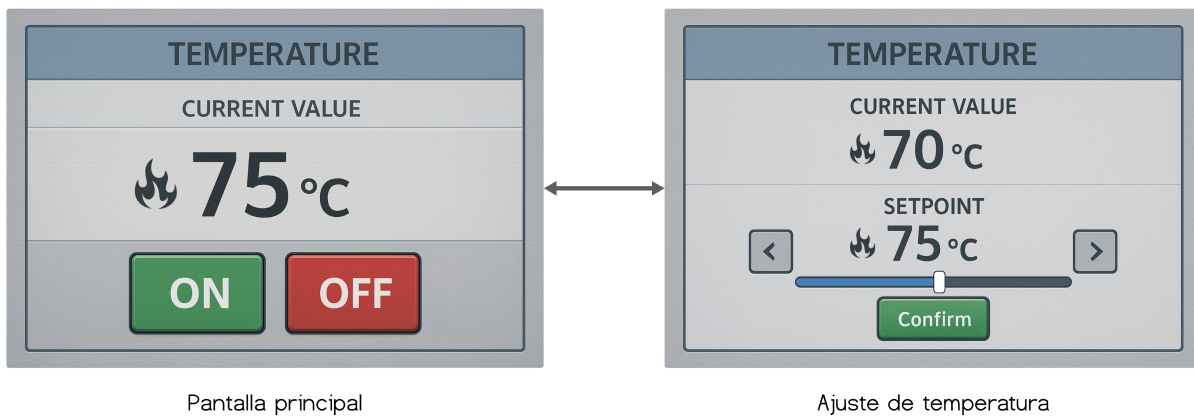
**Nota:** Describe la rutina de control automático durante la fase estable de operación.

Como complemento a la definición de la lógica de control, se presenta a continuación una

imagen referencial del posible diseño de la interfaz HMI. Esta propuesta incluye dos pantallas principales, una destinada a la visualización en tiempo real de la temperatura del proceso y otra que permite al operador ajustar el valor objetivo de precalentamiento. Se aclara que este diseño es ilustrativo y deberá ser refinado y adaptado en una fase posterior de implementación, asegurando su correcta funcionalidad y una experiencia de uso intuitiva para el operario.

**Figura 42**

*Pantallas principales del HMI para el monitoreo y ajuste de la temperatura del horno.*

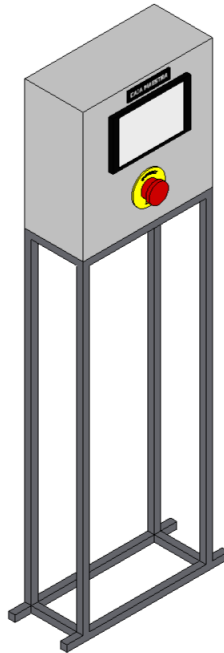


**Nota:** Diseño referencial. Su funcionalidad y apariencia podrán ajustarse en la etapa de implementación.

Tras presentar el diseño referencial de la interfaz HMI, se plantea ahora la estructura física que alojará los elementos clave del sistema de control. En particular, se propone una caja maestra que integrará el HMI, el ESP32, las fuentes de alimentación, protecciones eléctricas y dispositivos auxiliares necesarios para el funcionamiento del sistema. Esta unidad concentrará la lógica de control del horno y servirá como base para el montaje y conexión de sus componentes. A continuación, se muestra un modelo representativo de dicha estructura.

### Figura 43

*Modelo representativo de la caja maestra.*



**Nota:** Representación referencial. La disposición final de los componentes podrá ajustarse según requerimientos técnicos y espaciales durante la implementación.

#### **5.4. Elaboración de la propuesta presupuestaria para la implementación del horno desarrollado.**

Este capítulo presenta la propuesta presupuestaria para la implementación del horno desarrollado, marcando la transición hacia las dos últimas etapas del diseño según Norton: la creación de prototipos y pruebas, y la producción. Si bien estas fases representan la culminación del proceso de diseño, el alcance de este trabajo de titulación no profundiza en su ejecución detallada, dejando su desarrollo final a criterio de la empresa. No obstante, se proporciona una estimación de los costos requeridos para poner en marcha la solución propuesta, con el fin de ofrecer a la organización una base referencial para su futura materialización.

### 5.4.1. Creación de prototipos y pruebas

Se identifican los costos necesarios como base para la elaboración del Bill of Materials (BOM) y la propuesta presupuestaria para la implementación del horno de precalentamiento. Para ello, se definen los costos directos e indirectos. La Tabla 19 presenta de forma general estos elementos, que servirán de punto de partida para el cálculo detallado de cantidades y precios unitarios.

**Tabla 19**

*Identificación general de los costos directos e indirectos contemplados para la implementación del horno.*

Categoría	Elemento	Descripción
Costos Directos	Materiales principales	Insumos para la fabricación de la estructura, el aislamiento térmico y los componentes de la cámara de combustión.
Costos Directos	Sistema de combustión	Elementos para la instalación de los quemadores, tuberías, válvulas y accesorios relacionados con la alimentación y control de gas.
Costos Directos	Sistema de control	Componentes electrónicos y de automatización necesarios para el monitoreo, regulación y seguridad del horno.
Costos Directos	Servicios	Actividades de manufactura y ensamblaje como cortes, soldaduras, armado de componentes y pruebas de funcionamiento.
Costos Indirectos	Consumibles	Materiales de uso auxiliar y accesorios menores necesarios durante la fabricación y montaje.
Costos Indirectos	Logística e imprevistos	Costos asociados al transporte, herramientas complementarias y una reserva para gastos no previstos durante la ejecución.

**Nota:** Los materiales y servicios indicados corresponden a una identificación preliminar sin precios ni cantidades, base para el cálculo detallado en el Bill of Materials (BOM) y la propuesta presupuestaria final.

Una vez identificados los costos directos e indirectos para la implementación del horno, se

detalla la estimación de la mano de obra necesaria para las distintas fases del proyecto. Esta etapa complementa la definición de recursos, permitiendo cuantificar horas-hombre, perfiles técnicos requeridos y costos asociados para actividades de fabricación, montaje, instalación de sistemas de combustión y control, así como pruebas y ajustes finales. Con ello, se proyecta un valor referencial de inversión en mano de obra, que se integra al presupuesto global consolidado en el Bill of Materials.

**Tabla 20**

*Estimación de horas-hombre, perfiles requeridos y costos asociados.*

<b>Actividad</b>	<b>Perfil técnico</b>	<b>Tiempo estimado [h]</b>	<b>Tarifa [USD/h]</b>	<b>Costo total [USD]</b>
Corte de planchas	DIPAC	1	504.00	504.00
Soldadura de estructura	Soldador	3	2.67	8.01
Fabricación de quemadores	Remibrass	2	10.00	20.00
Montaje cámara térmica	Operario general	16	2.67	42.72
Fabricación de chispero	Ing. Mecatrónico	3	15.00	45.00
Instalación de sistema electrónico	Ing. Mecatrónico	15	15.00	225.00
Pruebas y puesta en marcha	Ing. Mecatrónico	8	15.00	120.00
Honorarios profesionales	Ing. Mecatrónico	176	2.67	470.00

**Nota:** Los valores son referenciales y permiten dimensionar el recurso humano necesario para la ejecución del proyecto.

Una vez determinada la estimación de la mano de obra, se presenta el Bill of Materials (BOM), que consolida los principales materiales y componentes necesarios para la construcción e implementación del horno. Esta tabla detalla cantidades y valores referenciales, sirviendo como base para proyectar la inversión requerida. Cabe mencionar que el listado se enfoca en los elementos más representativos, por lo que su alcance podría ampliarse o ajustarse durante la etapa de ejecución según las necesidades reales del proyecto.

Los valores unitarios consignados en el Bill of Materials (BOM) se calcularon a partir de cotizaciones y consultas de precios realizadas en julio de 2025 con proveedores locales y

plataformas como Kywi, Juan Montero, Samothermal, Ineev, DIPAC, Mercado Libre, Itead y Amazon. Esta información se considera referencial y orientativa para fines de estimación de costos.

**Tabla 21**

*Detalle del Bill of Materials (BOM) para la implementación del horno de precalentamiento.*

<b>Código</b>	<b>Descripción</b>	<b>Unidad</b>	<b>Cantidad</b>	<b>Costo unitario [USD]</b>	<b>Subtotal [USD]</b>
MAT-01	Plancha de acero 5 mm	m <sup>2</sup>	7	41.05	287.39
MAT-02	Plancha de acero 12 mm	m <sup>2</sup>	1	98.53	98.53
MAT-03	Perfil “L” 50 x 5 mm	m	6	3.30	19.83
MAT-03	Perfil “L” 50 x 6 mm	m	6	3.30	19.83
MAT-04	Perfil “L” 20 x 3 mm	m	10	3.30	33.00
MAT-05	Caja de paso 20x20x9 cm	und	1	12.00	12.00
COMB-01	Ladrillo JM26	und	70	6.79	475.3
COMB-02	Mortero refractario	lb	11	4.45	48.95
COMB-03	Manta refractaria	m <sup>2</sup>	4	15.77	63.1
COMB-04	Manguera de gas inoxidable	m	2	11.50	23
COMB-05	Pintura alta temperatura	lt	5	12.09	60.45
COMB-06	Válvula de bola 1/2"	und	1	6.08	6.08
COMB-07	Válvula anti-retorno 1/2"	und	1	9.76	9.76
ELEC-01	ESP32-S3	und	1	15.00	15.00
ELEC-02	HMI Nextion 4.3” Resistiva	und	1	59.90	59.90
ELEC-03	Termocupla K + MAX6675	und	3	8.00	24.00
ELEC-04	Presostato Danfoss KPI35	und	1	49.00	49.00
ELEC-05	Caudalímetro YF-S201	und	1	9.50	9.50
ELEC-06	Electrodo sensor de llama	und	1	17.99	17.99
ELEC-07	Módulo relé SSR 60VDC	und	2	18.80	37.60
ELEC-08	Válvula solenoide 110VAC	und	1	43.25	43.25

Código	Descripción	Unidad	Cantidad	Costo unitario [USD]	Subtotal [USD]
ELEC-09	Válvula bola motorizada U.S. Solid	und	1	38.99	38.99
ELEC-10	Módulo PWM Mosfet	und	1	3.05	3.05
ELEC-11	Botón de emergencia	und	1	18.55	18.55
ELEC-12	Fuente 110VAC-5VDC	und	1	20.98	20.98
SER-001	Corte de planchas	kg	280	1.80	504.00
SER-002	Soldadura estructural	serv	1	8.01	8.01
SER-003	Fabricación de quemadores	serv	1	20.00	20.00
SER-004	Montaje cámara térmica	serv	1	42.72	42.72
SER-005	Fabricación chispero	serv	1	45.00	45.00
SER-006	Instalación de sistema electrónico	serv	1	225.00	225.00
SER-007	Pruebas y puesta en marcha	serv	1	120.00	120.00
SER-008	Honorarios profesionales	serv	1	470.00	470.00
IND-01	Tornillería	pkg	10	0.35	3.50
IND-02	Cable 4 hilos (2 m)	m	2	0.95	1.90
IND-03	Transporte ladrillos y planchas	serv	2	10.00	20.00
IND-04	Costos de importación	serv	1	45.40	45.40

**Nota:** Los precios presentados pueden variar según condiciones de mercado y disponibilidad de materiales.

La propuesta presupuestaria consolidada, que recoge los valores totales estimados para la fabricación, montaje y puesta en marcha del horno, se presenta en el Anexo 10. Esta propuesta se basa en la información del Bill of Materials (BOM) como referencia para estimar los principales insumos y servicios, organizando los costos por partidas generales. Además, se incluye un margen adicional del 10% como medida de contingencia ante posibles imprevistos técnicos o logísticos. La validez de esta propuesta es de 30 días, considerando que los valores pueden variar según la disponibilidad y condiciones del mercado.

## **5.5. Producción**

La fase de producción del horno no se desarrolla dentro del alcance de este trabajo de titulación, ya que su ejecución corresponde a una etapa posterior bajo la responsabilidad de la empresa Remibrass S.A. Con la información técnica, los cálculos y la propuesta presupuestaria expuestos, la organización dispone de una base suficiente para evaluar y definir su implementación cuando lo considere pertinente, ajustando los aspectos operativos y logísticos de acuerdo con sus prioridades y capacidades.

## **6. Resultados**

Esta sección expone los resultados obtenidos durante el desarrollo del trabajo de titulación, organizados de acuerdo con los objetivos específicos planteados. Se presenta el análisis de los datos relevantes, relacionándolos con los fundamentos teóricos y prácticos que sustentan la propuesta. Los resultados permiten valorar el impacto técnico y operativo de la solución diseñada, así como su potencial de innovación y aplicación en la línea productiva de la empresa.

### **6.1. Análisis de las condiciones actuales de operación del horno, parámetros estructurales, térmicos y operativos que determinan su desempeño.**

Para cumplir con el primer objetivo específico, se levanta información técnica del horno de precalentamiento, con el propósito de identificar los parámetros estructurales, térmicos y operativos que determinan su desempeño. Este análisis permite avanzar hacia una futura tecnificación del proceso y fundamentar decisiones de mejora. Se toma como referencia el horno 2, por ser el más representativo dentro del proceso productivo. La Tabla 24 resume sus principales características estructurales, incluyendo dimensiones, capacidad y materiales de construcción.

**Tabla 22**

*Características estructurales horno #2.*

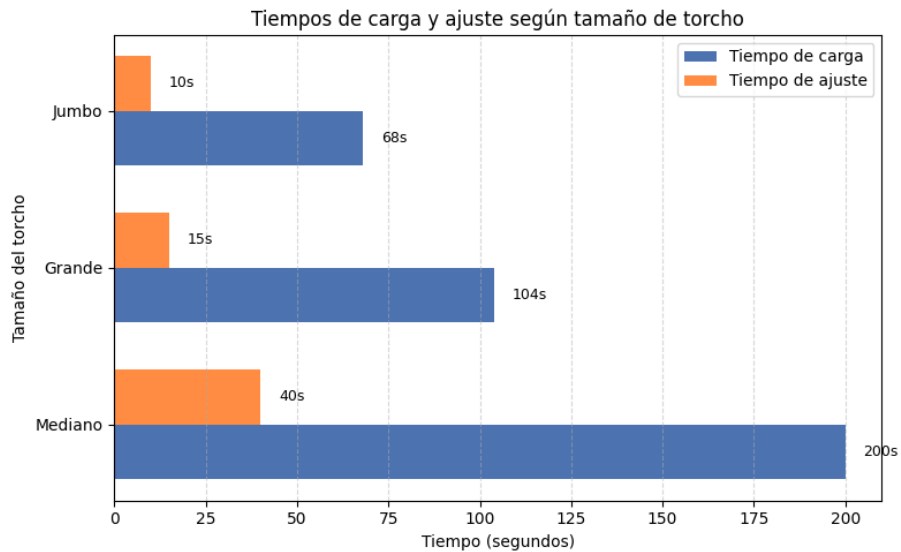
Dimensiones	Volumen	Materiales constructivos	Disposición física
0.67 m × 0.55 m × 1.51 m	74,82 L	Acero estructural, ladrillo refractario, mortero	Abierto

**Nota:** Las dimensiones corresponden a las medidas exteriores de cada horno. El volumen indica el espacio útil de la cámara de calentamiento, donde se alojan los torchos. Para información detallada, véase los anexos.

A continuación, se presenta la figura 46, donde se registran los tiempos involucrados en la etapa de carga del horno.

**Figura 44**

*Registro de tiempos durante la carga y ajuste del material.*



**Nota:** El tiempo de carga corresponde al lapso utilizado para introducir los torchos en el interior del horno, mientras que el tiempo de ajuste se refiere a su correcta distribución dentro del mismo.

Finalmente, la Tabla 27 presenta el balance térmico del horno, donde se cuantifican las pérdidas de calor a través de las paredes, la energía suministrada por el soplete, la fracción de calor útil y el número estimado de piezas que pueden ser precalentadas por ciclo, junto con la eficiencia energética estimada para las condiciones actuales.

**Tabla 23**

*Rendimiento Térmico del Horno.*

Pérdidas en paredes	$Q$ suministrado	$Q$ útil	N° de piezas	Eficiencia
529.37 W	85927.50 kJ	1172.24 kJ	20	1.36%

## 6.2. Diseño de la estructura mecánica y el sistema de generación de calor para el horno de precalentamiento de bronce.

Se desarrolla un nuevo diseño para el horno de precalentamiento de bronce, el cual incorpora mejoras estructurales y funcionales orientadas a mejorar su desempeño. A continuación, se detallan las dimensiones, materiales y características constructivas de esta propuesta, junto con los parámetros operativos y térmicos que permiten establecer una comparación técnica con el horno actualmente en uso.

**Tabla 24**

*Resumen de parámetros estructurales del diseño propuesto.*

Dimensiones	Volumen	Materiales constructivos	Disposición física
0.63 m × 0.63 m × 1.53 m	78,97 L	Acero estructural, ladrillo refractario, manta refractaria, mortero	Abierto

**Nota:** Las dimensiones corresponden a las medidas exteriores de cada horno. El volumen indica el espacio útil de la cámara de calentamiento, donde se alojan los torchos. Para información detallada, véase los anexos.

El rediseño del horno contempla un análisis estructural que verifica la integridad mecánica del sistema ante las condiciones de carga estática y térmica que se presentan durante su funcionamiento. A continuación, se resumen los parámetros más relevantes del análisis estructural.

**Tabla 25**

*Resumen de resultados del análisis estructural del diseño propuesto.*

Elemento analizado	Carga total considerada [kg]	Esfuerzo total [MPa]	Límite de fluencia [MPa]	Deformación máxima [ $\mu m$ ]	Factor de seguridad
Pie de apoyo (unidad)	415.5	131.49	250	10.1242	1.90

**Nota:** Los resultados corresponden al análisis en condiciones de operación estable, considerando carga estática, carga térmica y fijación en los extremos de la base.

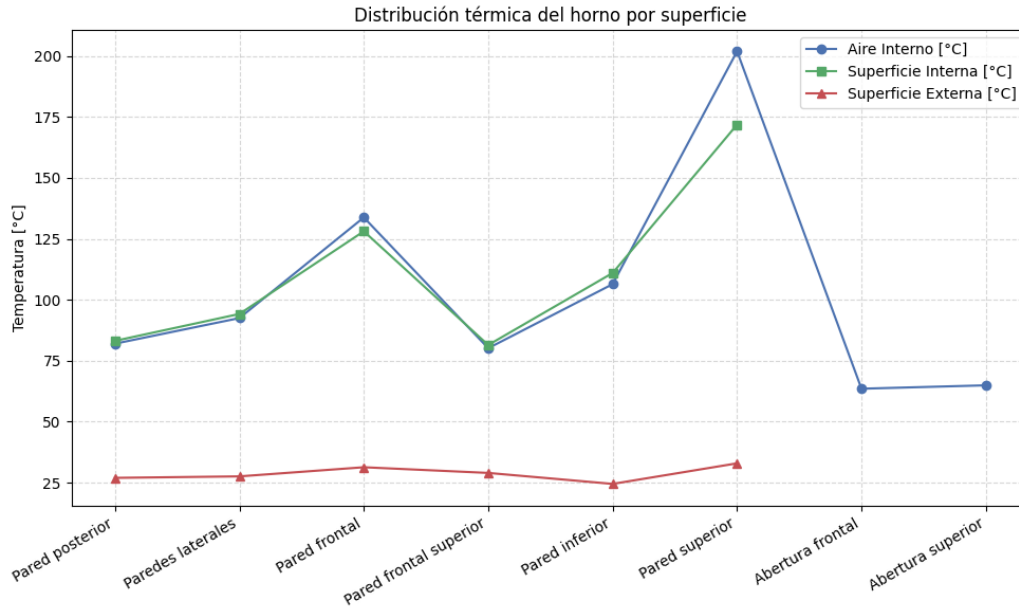
Dado que el horno propuesto aún no ha sido construido, no es posible medir directamente sus tiempos de carga y ajuste de material. No obstante, considerando que mantiene una configuración operativa similar en cuanto a dimensiones y capacidad, se asume que estos tiempos serán equivalentes a los registrados en el horno actualmente en funcionamiento. Por tanto, se presentan como una proyección razonable para esta propuesta.

La seguridad operativa constituye un eje fundamental en el diseño del horno. Para prevenir quemaduras por contacto prolongado con superficies calientes, se aplica el criterio establecido en la norma ISO 13732-1:2006, que define límites de temperatura admisibles para distintos materiales. En este caso, al tratarse de superficies externas metálicas sin recubrimiento, se considera un umbral de seguridad de 55 °C para un tiempo de contacto de hasta 5 segundos.

Con el fin de verificar el cumplimiento de este criterio, se realiza un análisis térmico de las superficies del horno, siguiendo la metodología empleada en la sección *Parámetros térmicos*. Paralelamente, este análisis también proporciona datos clave para el cálculo posterior de pérdidas de calor a través de las paredes. A continuación, se presentan las temperaturas obtenidas en tres superficies características del horno.

**Figura 45**

*Distribución térmica del horno por superficie.*



**Nota:** Temperaturas simuladas según la metodología de la sección *Parámetros térmicos*.

Los valores presentados permiten identificar las condiciones térmicas predominantes en cada una de las superficies del horno. Con base en esta distribución, se procede a determinar los parámetros necesarios para el cálculo de pérdidas térmicas, como el número de Nusselt ( $Nu$ ), el coeficiente de convección ( $h$ ) y el tipo de flujo considerado en cada caso.

**Tabla 26**

*Parámetros utilizados y coeficientes de convección obtenidos por superficie.*

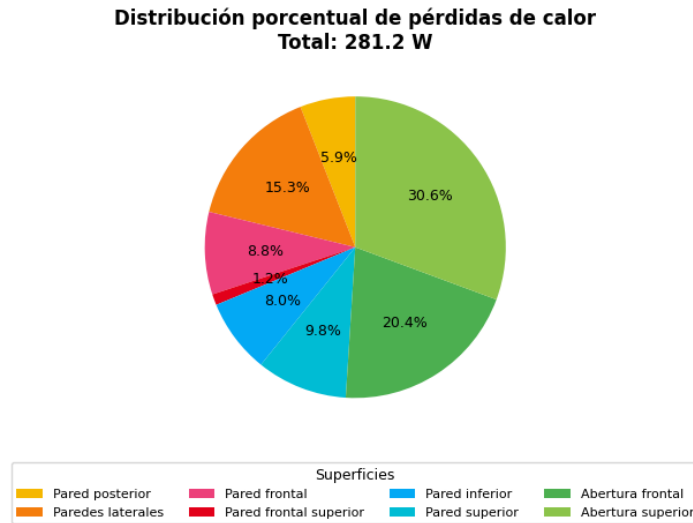
<b>Elemento</b>	<b>L [m]</b>	<b>Nu</b>	<b>h [W/m<sup>2</sup>°C]</b>	<b>Disposición</b>
Pared interior posterior	0.605	32.278	1.5852	Vertical
Pared interior lateral	0.1165	8.582	2.2463	Vertical
Pared interior frontal	0.390	17.895	1.5192	Vertical
Pared interior frontal superior	0.215	14.362	1.9764	Vertical
Pared interior inferior	0.1125	5.752	1.6134	Horizontal hacia arriba
Pared interior superior	0.0844	8.520	3.7263	Horizontal hacia abajo
Abertura frontal	0.225	51.751	6.5148	Vertical
Abertura superior	0.0643	9.168	4.1006	Horizontal hacia arriba
Pared exterior posterior	0.670	72.109	2.7385	Vertical
Pared exterior lateral	0.1529	20.672	3.4431	Vertical
Pared exterior frontal	0.540	69.628	3.3016	Vertical
Pared exterior frontal superior	0.125	18.476	3.7719	Vertical
Pared exterior inferior	0.1575	9.106	1.4658	Horizontal hacia arriba
Pared exterior superior	0.094	16.747	4.5725	Horizontal hacia abajo

**Nota:** Los valores de Nu y  $h$  se calculan en función de las temperaturas simuladas y las condiciones de convección natural en aire.

Considerando los parámetros de diseño y los cálculos de transferencia de calor, se estiman las pérdidas de energía del nuevo horno a través de sus paredes. Estos valores son esenciales para evaluar la eficiencia térmica global del equipo.

**Figura 46**

*Distribución de pérdidas de calor - nueva propuesta.*



**Nota:** Los valores se han determinado considerando el coeficiente de convección obtenido para cada superficie y su correspondiente diferencial de temperatura.

Con base en el diseño estructural, el sistema de generación de calor y los análisis térmicos realizados, se determinan los parámetros térmicos del nuevo horno. La siguiente tabla resume el rendimiento energético estimado del equipo.

**Tabla 27**

*Rendimiento Térmico del Horno.*

Pérdidas en paredes	$Q$ suministrado	$Q$ útil	N° de piezas	Eficiencia
281.2028 W	36 524.92 kJ	2 344.47 kJ	40	6.42%

La eficiencia alcanzada en esta propuesta se relaciona directamente con la implementación de dos sopletes, como se muestra en la figura 22, lo que permite una mejor distribución del calor y una mayor cobertura sobre las piezas. Adicionalmente, al considerar el caudal máximo de extracción de GLP, valor que asegura una operación estable sin llegar a congelar el cilindro,

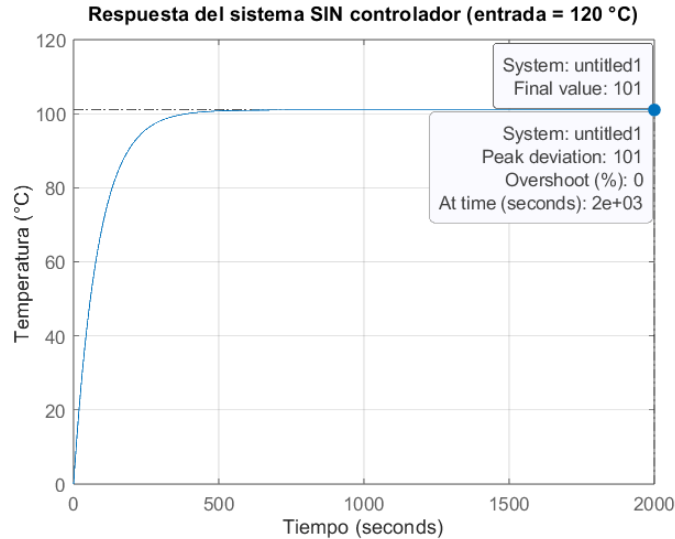
se evita la inyección excesiva de combustible. Esto favorece un uso más racional del gas, reduciendo así el desperdicio energético. De esta manera, el nuevo sistema de generación de calor contribuye significativamente al mejor desempeño térmico del horno.

### 6.3. Diseño de un sistema de control para monitorear la temperatura durante el proceso de precalentamiento de bronce.

Debido a la disposición abierta del horno, se produce un ingreso de aire superior al necesario para una combustión estequiométrica. Aunque esta condición asegura la presencia continua de oxígeno, también compromete la estabilidad térmica del sistema, generando fluctuaciones no deseadas en la temperatura interna. En ausencia de un sistema de regulación, la dinámica térmica resultante se desvía de los valores de consigna definidos para el proceso.

**Figura 47**

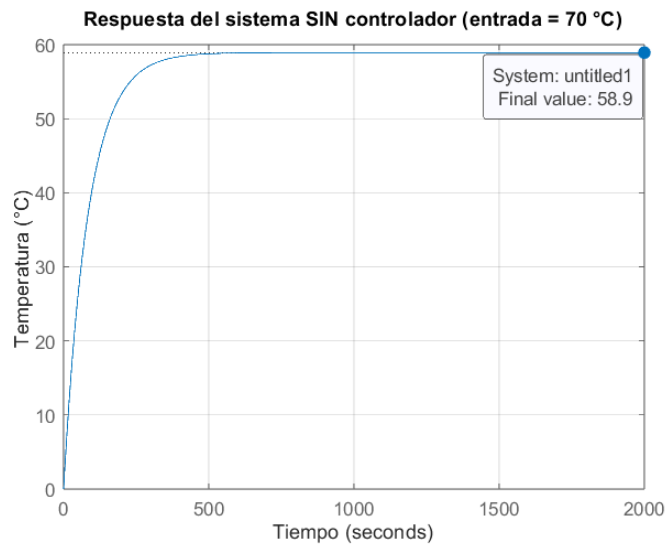
*Comportamiento térmico sin regulación. Consigna de 120°C.*



**Nota:** La respuesta corresponde al comportamiento térmico del sistema sin la acción de un controlador.

**Figura 48**

*Comportamiento térmico sin regulación. Consigna de 70°C.*

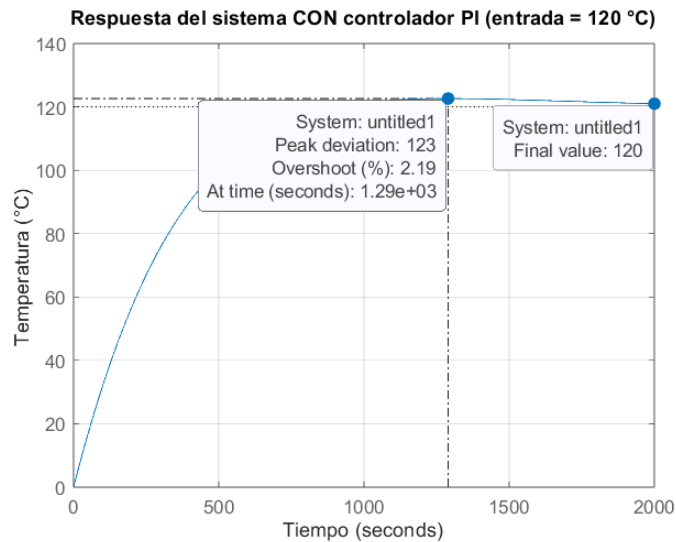


**Nota:** La respuesta corresponde al comportamiento térmico del sistema sin la acción de un controlador.

Ante este escenario, el sistema de control de temperatura diseñado permite mantener la dinámica térmica dentro de los rangos esperados. A continuación, se muestran los resultados obtenidos al incorporar el controlador, demostrando una respuesta más estable, con oscilaciones menores a  $\pm 10,^{\circ}\text{C}$  y convergencia eficiente hacia el punto de consigna. Este desempeño confirma la viabilidad del esquema propuesto para garantizar un precalentamiento controlado y confiable.

**Figura 49**

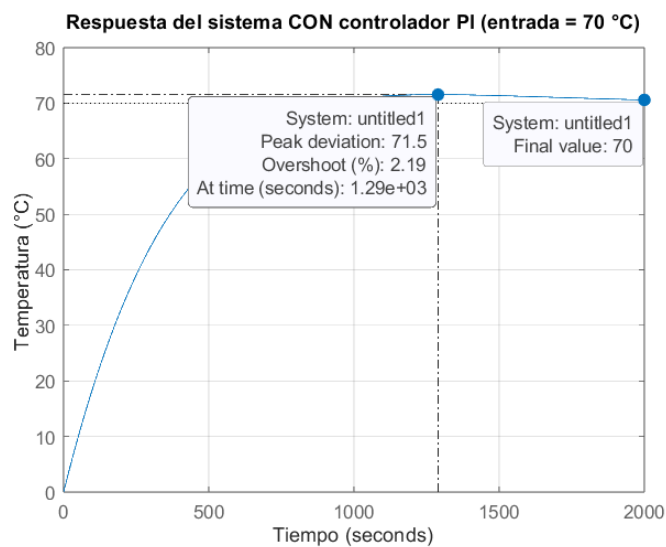
*Comportamiento térmico con regulación PI. Consigna de 120 °C.*



**Nota:** La acción del controlador PI mejora el desempeño térmico del sistema.

**Figura 50**

*Comportamiento térmico con regulación PI. Consigna de 70 °C.*

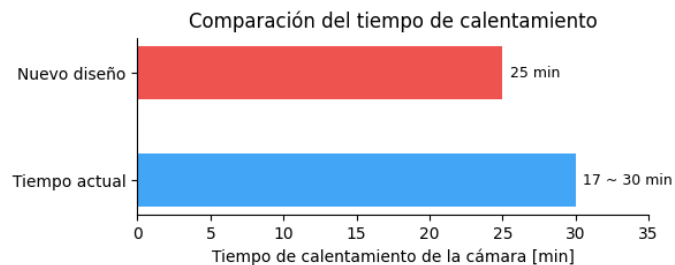


**Nota:** La acción del controlador PI mejora el desempeño térmico del sistema.

Además de mejorar la estabilidad térmica, la implementación del sistema de control permite estandarizar el tiempo requerido para alcanzar la temperatura de consigna. En la figura 51, se compara el tiempo de precalentamiento entre el sistema actual y el sistema propuesto.

### Figura 51

*Comparación del tiempo de precalentamiento: sistema actual vs. sistema propuesto.*



**Nota:** En el sistema actual, el tiempo de calentamiento varía entre 17 y 30 minutos. El sistema propuesto estandariza este valor a 25 minutos.

De este modo, se elimina la dependencia del juicio operativo y se asegura un tiempo de establecimiento uniforme de 1500 segundos. Esta estandarización fortalece la continuidad del proceso y reduce la incertidumbre inherente a la intervención humana.

## 6.4. Elaboración de la propuesta presupuestaria para la implementación del horno desarrollado.

Durante el desarrollo del diseño, se ha establecido como criterio fundamental que el costo total de implementación no supere los \$4 000 USD, considerando su viabilidad frente a opciones de fabricación externa o adquisición en el mercado. La propuesta presupuestaria final alcanza un valor de \$3 278.80 USD, cumpliendo con el límite establecido y evidenciando una solución técnicamente funcional y económicamente competitiva. El Anexo 10 presenta un resumen general de los costos, mientras que el desglose detallado de componentes y materiales se encuentra en la lista de materiales (Bill of Materials – BOM).

## 7. Cronograma

**Tabla 28**

*Cronograma de actividades.*

CRONOGRAMA DE ACTIVIDADES																						
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	ACTIVIDADES	MES 1				MES 2				MES 3				MES 4				MES 5				HORAS
		1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	
Analizar las condiciones actuales de operación del horno, identificando los parámetros estructurales, térmicos y operativos que determinan su desempeño.	Realizar un levantamiento de información en la empresa, tomando medidas físicas del horno y registrando su disposición.	X	X																			10
	Observar y documentar el proceso de precalentamiento, identificando tiempos, temperatura y consumo energético.	X	X																			10
	Simular el comportamiento térmico del horno actual mediante herramientas de software.			X	X																	15
	Evaluar las ineficiencias del sistema actual y definir los parámetros clave que servirán como referencia para la mejora.				X	X																10
Diseñar una estructura mecánica y un sistema de generación de calor eficiente para el horno de precalentamiento de bronce para la producción de espartallamas en la empresa Remibrass S.A.	Revisar bibliografía sobre materiales refractarios, eficiencia térmica y diseño de hornos industriales.					X	X															10
	Desarrollar tres propuestas de diseño que integren mejoras en aislamiento térmico y distribución del calor.							X	X	X												20
	Simular cada propuesta para evaluar su desempeño en términos de eficiencia térmica.							X	X	X												20
	Seleccionar la mejor alternativa con base en criterios técnicos y validarla con la empresa.										X											5
Diseñar un sistema de control que permita monitorear la temperatura durante el proceso de precalentamiento de bronce en la producción de espartallamas en la empresa Remibrass S.A.	Investigar sobre sistemas de monitoreo y control de temperatura en procesos industriales.												X									10
	Seleccionar dispositivos adecuados para la medición de temperatura.												X									10
	Diseñar el esquema de mando y fuerza, junto con el diagrama P&ID, para representar la arquitectura del sistema de control.												X	X								15
	Simular el sistema de control para verificar su desempeño.														X	X	X					25
Elaborar una propuesta presupuestaria para la implementación del horno desarrollado.	Identificación de los costos directos e indirectos.																	X				5
	Cálculo de la mano de obra.																		X			5
	Elaboración del Bill of Materials (BOM).																			X		5
	Desarrollo de la propuesta presupuestaria.																				X	10
	Redacción de documento	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	X	55
<b>Total de horas empleadas</b>																					<b>240</b>	

**Nota:** La tabla presenta las actividades para cumplir con los objetivos planteados.

## 8. Presupuesto

### 8.1. Talento humano

Tabla 29

*Recurso de talento humano.*

Cargo	Nombre	Costo hora	horas al mes	Total de horas	Costo total
Tutor	Ing. Diego Urgilés	18\$	4	20	360 \$
Autor 1	David Lupercio	8\$	48	240	3200 \$

**Nota:** En la tabla se observa el costo de las 240 horas establecidas en el cronograma de trabajo y el costo de las horas de revisión por parte del docente tutor.

### 8.2. Recursos materiales

Tabla 30

*Estimación de recursos materiales.*

Denominación	Cantidad	Horas	Unitario (\$)	Total (\$)
Software	2.00	240.00	0.50	240.00
Computador	1.00	240.00	3.45	828.00
Consumo eléctrico	1.00	240.00	0.09	21.60
Transporte	12.00	1.00	2.50	30.00
Laboratorios	2.00	24.00	60.00	2,880.00
<b>Costo total estimado</b>				<b>3,999.60</b>

**Nota:** La tabla presenta una estimación de los costos asociados al desarrollo del trabajo de titulación, considerando el uso de software SolidWorks y Matlab, laboratorios, equipo personal, consumo eléctrico y transporte. Los valores se calculan en función del tiempo de uso proyectado y tarifas aproximadas.

## 9. Conclusiones

El presente trabajo recoge las bases del entorno operativo actual y establece el fundamento técnico para avanzar hacia el concepto de industria 3.0, con el objetivo de mejorar el proceso de producción de espartallamas en la empresa Remibrass S.A. El diseño del nuevo horno de precalentamiento de bronce parte del análisis de los parámetros estructurales, operativos y térmicos que determinan el comportamiento del sistema. A partir de esta caracterización, y en diálogo con el personal de la empresa, se identifica una oportunidad concreta de mejora.

El análisis del horno artesanal evidencia pérdidas térmicas significativas, atribuibles a su diseño abierto, a la ausencia de aislamiento y a la falta de control automático. La caracterización térmica permite identificar parámetros clave como el tiempo de respuesta, el efecto del exceso de aire y la intervención constante del operador. Esta información sustenta la necesidad de desarrollar una alternativa técnica que responda de mejor manera a las condiciones reales de operación, considerando que, según las estimaciones realizadas, el sistema apenas aprovecha un 3.59 % de la energía que ingresa.

Con base en estos resultados, se diseña un sistema mecatrónico orientado a mejorar el desempeño del equipo, en respuesta a los requerimientos del cliente. Tras evaluar diversas alternativas, se adopta la opción que mejor se ajusta a los criterios definidos por la empresa. El nuevo diseño estructural del horno incorpora mejoras para una mayor retención térmica, mayor seguridad operativa y facilidad de fabricación, priorizando materiales industriales disponibles en el mercado y una configuración que favorece el ensamblaje y el mantenimiento.

El sistema de generación de calor se rediseña sobre la base del uso de antorchas de gas, incrementando el número de quemadores con el objetivo de cubrir una mayor superficie de las piezas. La empresa, al contar con experiencia en la fabricación de elementos de combustión, ha confirmado que la propuesta es viable y puede ser implementada con los recursos y conocimientos disponibles. Como resultado de las mejoras planteadas, el aprovechamiento energético del sistema se incrementa a un 9.2 %.

Como parte del diseño estructural, se desarrolla el análisis de resistencia de la estructura, obteniendo un factor de seguridad aproximado de 1.90 para los pies de apoyo, lo cual garantiza un comportamiento mecánico seguro. De forma complementaria, se determina el caudal

máximo de extracción de GLP, con el propósito de evitar el congelamiento de los cilindros. Esta condición queda limitada por las válvulas instaladas en el sistema.

A partir del análisis del comportamiento térmico del horno, se identifica un error del 15.84 % respecto al valor deseado. Inicialmente se contempla la opción de un control ON-OFF, sin embargo, se reconoce que esta estrategia actúa solo como un interruptor, provocando ciclos repetitivos de encendido y apagado. En sistemas de combustión a gas, esta dinámica puede generar pequeñas explosiones en cada arranque, lo que supone un riesgo para la seguridad operativa. Además, el control ON-OFF no permite adaptarse a la dinámica térmica del sistema ni ajustarse a parámetros específicos de desempeño.

En tal sentido, se opta por el diseño de un controlador PI basado en el modelo matemático que describe el comportamiento térmico del horno. Este enfoque permite regular la temperatura en función de la potencia suministrada, mejorando la estabilidad del sistema y afinando el desempeño. El sistema desarrollado monitorea y ajusta la temperatura automáticamente, notificando al operador cuando se alcanza el valor objetivo. Así, se elimina la dependencia del criterio individual y se evita el consumo innecesario de GLP, logrando un tiempo de establecimiento de 25 minutos y un error de 0% en estado estable.

Finalmente, la propuesta presupuestaria elaborada se ajusta al límite económico establecido desde el inicio del proyecto, con un costo total estimado de \$3,278.80 USD. El desglose de los componentes y costos asociados permite verificar la viabilidad de fabricación e implementación del horno, tanto con proveedores locales como internacionales, reforzando su aplicabilidad en contextos similares.

## 10. Recomendaciones

- Validar experimentalmente el diseño mediante la construcción de un prototipo del horno propuesto, con el fin de contrastar los resultados de simulación con el comportamiento real del sistema. Esta etapa permitirá ajustar el modelo de control y determinar con mayor precisión la temperatura objetivo, considerando la interacción térmica entre las piezas de bronce y el flujo de calor en condiciones reales de operación.
- Un análisis detallado de la composición del bronce utilizado en el proceso resulta fundamental para establecer con precisión la temperatura óptima de conformado. Conocer

este punto permite alcanzar la temperatura de recristalización sin excederla innecesariamente, lo que garantiza que el material adquiera la maleabilidad requerida sin incurrir en un consumo energético mayor al necesario. Además, al controlar adecuadamente la temperatura efectiva, es posible reducir la adhesión del material al troquel durante el conformado, una situación recurrente debido al calor generado en el propio proceso.

- Debido a la necesidad operativa de mantener el horno abierto durante el proceso productivo, resulta conveniente explorar alternativas como la implementación de cortinas de aire fundamentadas en convección forzada. Esta medida permitiría restringir el ingreso excesivo de aire al interior de la cámara térmica, favoreciendo la estabilidad de temperatura y reduciendo pérdidas energéticas asociadas al intercambio constante con el entorno.
- La aplicación de mecanismos de convección forzada sobre los cilindros de GLP representa una alternativa eficaz para mitigar el riesgo de congelamiento superficial. Dado que estos cilindros absorben calor del entorno durante su operación, la incorporación de flujo de aire forzado favorecería una transferencia térmica más eficiente con el ambiente. Esto permitiría aumentar el caudal de consumo en caso de ser requerido por la demanda del proceso y mantener condiciones más seguras de operación.
- Es pertinente considerar los diseños que emplean resistencias eléctricas como fuente de calor, ya que, conforme a lo demostrado en el presente trabajo, constituyen una alternativa segura y alineada con los enfoques actuales en la industria.
- El análisis de las condiciones ergonómicas asociadas al diseño seleccionado resulta relevante, especialmente en lo referente al levantamiento y manipulación de cargas. Se debe evitar tanto la carga a nivel del suelo como por encima del rango de los hombros, a fin de reducir riesgos físicos para el personal operativo. En ese sentido, resulta conveniente revisar las propuestas desarrolladas con orientación hacia una carga frontal, las cuales priorizan la ergonomía sin comprometer la funcionalidad del sistema.
- Analizar el impacto económico asociado a la implementación del horno a lo largo del tiempo, considerando indicadores como el retorno de inversión (ROI), la reducción en el consumo energético y la disminución de tiempos muertos operativos, con el objetivo de presentar un análisis financiero completo.
- Una línea de desarrollo futuro consiste en explorar una versión modular del diseño estructural que facilite su integración con etapas posteriores del proceso, particularmente

con el troquel de conformado. Este enfoque permitiría avanzar hacia un sistema continuo, en el que las piezas se desplacen directamente desde la zona de calentamiento hasta la etapa de conformado, optimizando tiempos de producción y reduciendo pérdidas térmicas.

## Referencias

- Ambiente Plástico. (2019). *Un repaso de la industria 1.0 a la 4.0*. Descargado de <https://ambienteplastico.com/un-repaso-de-la-industria-1-0-a-la-4-0/>
- Ansys Innovation Courses. (2020). *Homework, quizzes, simulation examples — radiation in heat transfer*. Descargado de <https://innovationspace.ansys.com/courses/courses/radiation-in-heat-transfer/lessons/homework-quizzes-simulation-examples-radiation/>
- Ascanio, I. & Ariza, S. (2018). Diseño de sistema de control automatizado para horno de tratamientos térmicos de aceros cúcuta-colombia. *AiBi Revista de Investigación, Administración e Ingeniería*, 6(2), 27–32. Descargado de <https://revistas.udes.edu.co/aibi/article/view/1696> doi: 10.15649/2346030X.482
- Bustamante, W. A. C., y Rosado, N. S. A. (2024). *Automatización de un horno industrial a gas con plc y su monitoreo a distancia* Universidad Politécnica Salesiana. Descargado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/27761/1/UPS-GT005249.pdf>
- Cadems. (2021). *Diseño mecánico: ¿en qué consiste y cuáles son las mejores herramientas?* Descargado de <https://www.cadems.es/disenio-mecanico-consiste-cuales-las-mejores-herramientas/>
- Calvo, C. S. (2016). Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas. *Scientia*, 17(17). Descargado de <https://doi.org/10.31381/scientia.v17i17.388> doi: 10.31381/scientia.v17i17.388
- Carrasco, P. I. J., y Rubio, P. A. P. (2022). *Diseño de un horno para procesos de tratamientos térmicos en la empresa fibroacero s.a.* Universidad Politécnica Salesiana. Descargado de <https://dspace.ups.edu.ec/bitstream/123456789/23553/1/UPS-CT010127.pdf>
- Construmatica. (2018). *Sistemas de generación de calor*. Descargado de [https://www.construmatica.com/construpedia/Sistemas\\_de\\_Generaci%C3%B3n\\_de\\_Calor](https://www.construmatica.com/construpedia/Sistemas_de_Generaci%C3%B3n_de_Calor)
- Coppermetal. (Consultado el 1 de abril de 2025). *Temperaturas de fusión de las aleaciones metálicas*. Descargado de <https://www.coppermetal.com.br/es/blog/temperaturas-de-fusion-de-las-aleaciones-metalicas/>
- EMIS. (2025). *Remibrass s.a. - perfil de la empresa*. Descargado de [https://www.emis.com/php/company\\_profile/EC/Remibrass\\_SA\\_es\\_8197868.html](https://www.emis.com/php/company_profile/EC/Remibrass_SA_es_8197868.html) (Accedido el 11 de febrero de 2025)
- Escuela de Organización Industrial. (2013). *Lean manufacturing: Metodología para mejorar los procesos de producción*. Disponible en: <https://fabricacion.industriales.upm.es/wp->

- content/uploads/2022/04/EOI\_LeanManufacturing\_2013.pdf.
- Greenery Refractarios. (2019). *El pasado y presente de los materiales refractarios*. Descargado de <https://www.greeneryrefractarios.com/info/the-past-and-present-of-refractory-materials-h-41688763.html>
- Groover, M. P. (2007). *Fundamentos de manufactura moderna: materiales, procesos y sistemas* (3ra ed.). México, D.F.: Prentice Hall.
- Hornos Samo Thermal. (2025). *Hornos industriales*. Descargado de <https://hornosyrefractarios.com.ec/> (Accedido: 2025-05-24)
- International Organization for Standardization (ISO). (2006). *Iso 13732-1:2006(e) – ergonomics of the thermal environment – methods for the assessment of human responses to contact with surfaces – part 1: Hot surfaces*. Descargado de <https://www.iso.org/obp/ui/en/#iso:std:iso:13732:-1:ed-1:v1:en>
- Linde. (2023). *Brochure: Precalentamiento y postcalentamiento*. Descargado de <https://tourvirtual.linde.mx/storage/2023/09/Brochure-precalentamiento-y-postcalentamiento.pdf> (Accedido el 24 de marzo de 2025)
- Mecanizados Garrigues. (Consultado el 26 de marzo de 2025). *Operaciones de mecanizado en torno*. Descargado de <https://www.mecanizadosgarrigues.es/blog/operaciones-mecanizado-torno/>
- Mecánica de la Moto. (2022). *¿Qué es la maleabilidad en un metal?* Descargado de <https://mecanicadelamoto.com/blog/que-es-la-maleabilidad-en-un-metal>
- Metalmecánica. (2023). *Tecnología infrarroja en hornos industriales*. Descargado de <https://www.metalmecanica.com/es/noticias/tecnologia-infrarroja-en-hornos-industriales>
- Metso. (2023). *Horno de precalentamiento*. Descargado de <https://www.metso.com/es/portafolio/horno-de-precalentamiento/>
- Morgan Thermal Ceramics. (Consultado el 25 de marzo de 2025). *Efecto del método de fabricación sobre el rendimiento del producto*. Descargado de [https://www.morganthermalceramics.com/media/ebtlpbnj/effect-of-manufacturing-method-on-production-performance\\_es.pdf](https://www.morganthermalceramics.com/media/ebtlpbnj/effect-of-manufacturing-method-on-production-performance_es.pdf)
- Nabertherm. (2025). *Hornos y equipos térmicos industriales*. Descargado de <https://nabertherm.com/en> (Accedido: 2025-05-24)
- Nise, N. S. (2015). *Control systems engineering* (7th ed.). Hoboken, NJ: Wiley.
- Norton, R. L. (2011). *Diseño de máquinas: un enfoque integrado* (4<sup>a</sup> ed.). México: Pearson Educación.
- Nutec Bickley. (2023). *Tipos de hornos industriales*. Descargado de <https://www>

- .nutecbickley.com/es/newsroom/articulos/tipos-de-hornos-industriales
- Ogata, K. (2010). *Modern control engineering (5th ed.)*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Quirón Prevención. (2019). *Manipulación de cargas. riesgos y medidas preventivas*. Descargado de <https://www.quironprevencion.com/blogs/es/prevenidos/manipulacion-cargas-riesgos-medidas-preventivas>
- Real Academia Española. (Consultado el 1 de abril de 2025). *Diccionario de la lengua española, 22.ª ed. en línea*. Descargado de <https://dle.rae.es/torcho>
- Refratechnik. (2025). *La historia de la técnica del refractario*. Descargado de <https://www.refra.com/es/La-historia-de-la-tecnica-del-refractario/>
- REMIBRASS S.A. (2025). *Definición del espartallamas en la fabricación de cocinas a gas*. Comunicación personal. (Entrevista con técnico de REMIBRASS, marzo de 2025)
- Schemin Perú. (2023). *Ladrillo refractario para horno: ¿cuál es su durabilidad?* Descargado de <https://scheminperu.com/ladrillo-refractario-para-horno-cual-es-su-durabilidad/>
- Ser, C. (2024). *Una empresa de onda pone en marcha el primer horno eléctrico de producción de la industria cerámica de España*. Descargado de <https://cadenaser.com/comunitat-valenciana/2024/09/12/una-empresa-de-onda-pone-en-marcha-el-primer-horno-electrico-de-produccion-de-la-industria-ceramica-de-espana-radio-castellon/>
- Smith, W. F., y Hashemi, J. (2006). *Fundamentos de la ciencia e ingeniería de materiales* (4ta ed.). México, D.F.: McGraw-Hill.
- Solidworks plans and pricing. (2025). Descargado de <https://www.solidworks.com/es/how-to-buy/solidworks-plans-pricing> (Accedido el 28 de marzo de 2025)
- Solá, P. M. (1991). *Tratamientos térmicos de los metales*. Barcelona, España: Marcombo.
- tech universidad tecnológica. (2022). *Diseño mecánico*. [Recuperado de: <https://www.techtute.com/ec/>; Accedido el: 2 de mayo del 2022].
- Universal Robots. (2023). *La evolución de la robótica industrial: de la industria 1.0 a la industria 4.0*. Descargado de <https://www.universal-robots.com/mx/blog/la-evoluci%C3%B3n-de-la-rob%C3%B3tica-industrial-de-la-industria-10-a-la-industria-40/>
- Universidad Nacional del Sur. (Consultado el 27 de marzo de 2025). *Balance en hornos*. Descargado de [http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/balance\\_en\\_hornos.pdf](http://biblioteca.uns.edu.pe/saladocentes/archivoz/curzoz/balance_en_hornos.pdf)
- Universidad Técnica de Ambato. (2021). *Gas licuado de petróleo (glp) en Ecuador*. Descarga-

do de <https://obest.uta.edu.ec/wp-content/uploads/2021/12/GLP-en-Ecuador.pdf>

*¿Qué estrategias son más efectivas para reducir los costos operativos en una empresa?* (2024). Descargado de <https://vocol.com/es/articulos/articulo-que-estrategias-son-mas-efectivas-para-reducir-los-costos-operativos-en-una-empresa-60341> (Accedido el 25 de marzo de 2025)

Çengel, Y. A. (2007). *Transferencia de calor y masa: un enfoque práctico* (3.<sup>a</sup> ed.). México, D.F.: McGraw-Hill Interamericana.

# **ANEXOS**

## Anexo 1: Hornos en Remibrass.



**Nota:** Se observa uno de los tres hornos utilizados para el precalentamiento de bronce en la empresa Remibrass S.A.

## Anexo 2: Resultado de la etapa de troquelado.



**Nota:** De la matriz del troquel se obtienen las estrías necesarias para el ensamblaje.

### Anexo 3: Torchos de Bronce.



**Nota:** Se observa uno de los tres tamaños de torcho.

## Anexo 4: Tamaños de espartallamas.



**Nota:** Se observan los tamaños de producto, en orden de izquierda a derecha, jumbo, grande y mediano.

# Anexo 5: Características del Ladrillo Refractario Recto Maxial

Technical data sheet



## MAXIAL 210 M

General information	
<b>Classification</b>	Fireclay product type FC40 ISO 10081-1
<b>Main raw material components</b>	Fireclay
<b>Bonding type</b>	Ceramic

Chemical analysis					
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	TiO <sub>2</sub>	CaO	K <sub>2</sub> O
46.0%	1.6%	48.0%	1.7%	0.4%	0.9%
Na <sub>2</sub> O	MgO				
0.5%	0.5%				
Determination on fired substance (1025 °C / 1877 °F) acc. to EN ISO 12677					

Physical properties			
<b>Bulk Density</b>	2,28	[g/cm <sup>3</sup> ]	EN 993-1
<b>Apparent Porosity</b>	18,0	[vol%]	EN 993-1
<b>Cold Crushing Strength</b>	50,0	[N/mm <sup>2</sup> ]	EN 993-5
<b>Modulus of Rupture</b>	9,0	[N/mm <sup>2</sup> ]	EN 993-6
<b>Hot Modulus of Rupt. (1250 °C / 2282 °F)</b>	3,5	[N/mm <sup>2</sup> ]	EN 993-7
<b>PLC (1400 °C / 2552 °F)</b>	-0,50	[%]	EN 993-10
<b>Refractoriness under Load T<sub>0</sub></b>	1100	[°C]	ISO 1893
<b>Refractoriness under Load T<sub>0,6</sub></b>	1300	[°C]	ISO 1893
<b>- with load</b>	0,200	[N/mm <sup>2</sup> ]	
<b>Pyrometric cone equivalent (cone no.: 29)</b>	1.659	[°C]	ASTM C24-01
<b>Hot load test (25 psi)</b>			ASTM C16
<b>- at test temperatures</b>	2.370	[°F]	
<b>- schedules</b>	1		
<b>- holding time</b>	1,5	[h]	
<b>- change in length</b>	-0,90	[%]	

The indicated values are standard values, i.e. values taken over a longer representative period of time according to either valid test standards or internal test methods. They may not be regarded as committed specifications and therefore not as guaranteed properties. We reserve the right to further technical developments and new editions of technical product information.

Revision: 04. MAY. 2018

MAXIAL 210 M 1 / 2

## MAXIAL 210 M

<b>Res. to Thermal Shocks Water</b>		30	[cycles]	DIN 51068-1
<b>Thermal Conductivity</b>	<b>500 °C / 932 °F</b>	1,20	[W/mK]	Dr. Klasse
	<b>750 °C / 1382 °F</b>	1,30	[W/mK]	Dr. Klasse
	<b>1000 °C / 1832 °F</b>	1,40	[W/mK]	Dr. Klasse
<b>CO-Resistance (class)</b>		A		ASTM C288
<b>Modulus of Deformation</b>		11.000	[N/mm <sup>2</sup> ]	

The indicated values are standard values, i.e. values taken over a longer representative period of time according to either valid test standards or internal test methods. They may not be regarded as committed specifications and therefore not as guaranteed properties. We reserve the right to further technical developments and new editions of technical product information.

Revision: 04. MAY. 2018

MAXIAL 210 M 2 / 2

# Anexo 6: Características del Mortero SUPERAEROFRAX

**GAMMA**

**ERECOS®**

**CORONA**  
Negocio de Energía

Carrera 49 No. 67 Sur 680  
Sabaneta, Colombia - 055450

Teléfono: [574] 305 8000  
ventas@erecos.com  
Nit: 890.900.121-4

## SUPERAEROFRAX

### Morteros refractarios

Los morteros refractarios se utilizan para pegar ladrillos refractarios y/o aislantes entre sí, a la estructura de los equipos, o a revestimientos refractarios y/o aislantes previamente instalados.

### Propiedades

Clasificación NTC-765, ASTM C - 851	Super duty	
Tipo	Húmedo de fraguado al aire	
Composición química (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	44.7
	SiO <sub>2</sub>	49.1
	TiO <sub>2</sub>	2.0
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	1.2
	CaO	0.3
	MgO	0.4
Álcalis	2.2	
Cono pirometrico equivalente	32 1/2	
Temperatura equivalente (°C) NTC - 706, ASTM C - 24	1724	
Refracteriedad (El mortero no fluye a la junta) NTC - 861, ASTM C - 199	1600°C	
Agua de preparación de mortero (ml/kg)		
Para aplicar con palustre	Como se entrega	
Para aplicar por inmersión	60	
Kg de mortero requerido para pegar 1000 ladrillos de 9x4 1/2x2 1/2		
Con palustre	180	
Por inmersión	160	
Presentación (Tambor)	25 kg	

### Aplicaciones

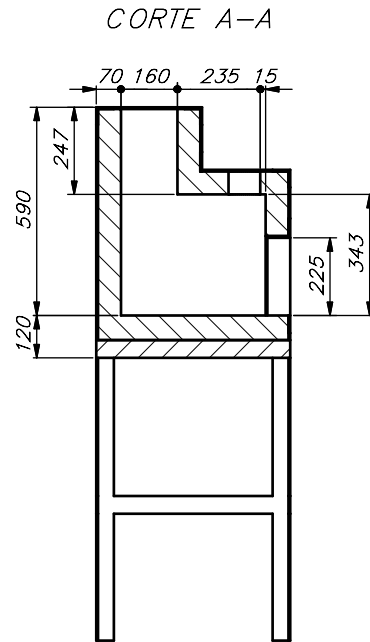
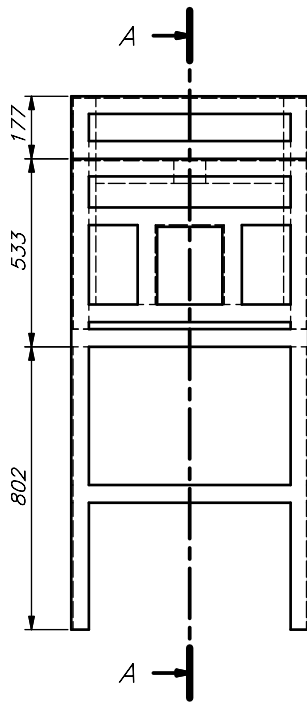
Mortero silico-aluminoso húmedo de fraguado al aire. Sus componentes principales, la alúmina y la sílice, hacen de este refractario Super Duty un producto adecuado para trabajar a elevadas temperaturas cuando es debidamente aplicado en ladrillos. Se recomienda para pegar los ladrillos refractarios densos ERCLAY LT, TP, U 32, U 33, ER 40, AQ 45M, AQ 45K, ERMULCOR, ABRASIC 50, AQ 50, AQ 60, ALUM 50, ANDALUBRICK CTE y ERCLAY SM. También se puede utilizar para pegar los ladrillos refractarios aislantes ER IFB 2300 y ER IFB 2600.

Las propiedades descritas en este documento se basan en los resultados promedio de las pruebas de control sobre lotes de producción industrial utilizando los procedimientos descritos en las normas ICONTEC y ASTM donde ellas sean aplicables, y no deben emplearse para efecto de especificaciones garantizadas. Pueden presentarse variaciones de los resultados dependiendo del tamaño, forma o proceso de fabricación.

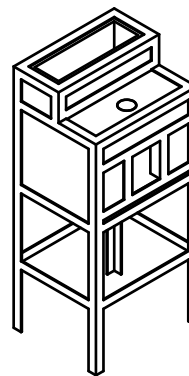
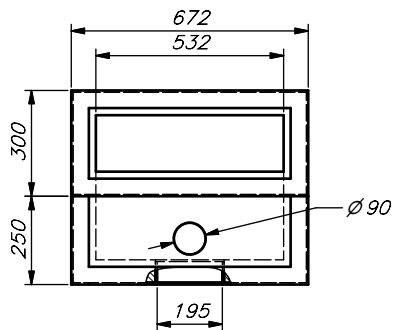
# Anexo 7: Dimensiones del horno #2 - Remibrass S.A.


- A6  
148x105
- A5  
210x148
- A4  
297x210
- A3  
420x297
- A2  
594x420
- A1  
841x594
- A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



ESCALA 1:25



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica	 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE MATRIZ CUENCA	
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025		
Proyección	Horno de precalentamiento #2 Remibrass S.A.			Escala: 1:15 Lámina N° 1/1

## Anexo 8: Características de la Manta Refractaria



### Fiberfrax Especificación del Producto

#### Manta Durablanket®

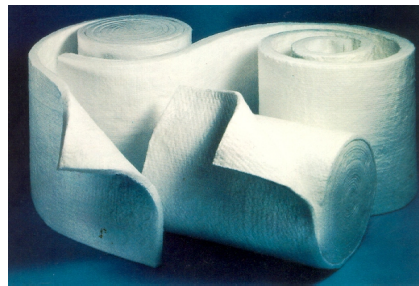
**Durablanket** es una manta de fibra cerámica resistente, liviana y flexible, fabricada a partir de fibras largas Fiberfrax. Estas fibras son multidireccionadas y entrelazadas mediante un proceso continuo de agujamiento, que le confiere al producto una excelente resistencia al manipuleo y a la erosión. Debido a este proceso, las mantas Durablanket no contienen agregado de ligante alguno.

La manta **Durablanket** es un aislante de alta refractariedad que posee las siguientes características:

- Alto grado de pureza química.
- Excelente resistencia al manoseo.
- Baja conductividad térmica.
- Bajo almacenamiento de calor.
- Baja densidad.
- Excelente resistencia al choque térmico.
- Alta reflexión de calor.
- Buena absorción al sonido.
- Excelente resistencia a la corrosión.

#### Propiedades Químicas

**Durablanket** no es afectada por la mayoría de los ácidos o agentes corrosivos, con excepción de los ácidos hidrofúorídricos, fosfóricos y de los álcalis concentrados. Posee un buen comportamiento ya sea sometida a atmósferas reductoras u oxidantes. Mojada por agua, vapor o aceites, sus propiedades térmicas y físicas se restablecen por completo al secarse.



#### Análisis Químico Típico

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	47 a 53%
SiO <sub>2</sub>	48 a 53%
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0,04%
TiO <sub>2</sub>	0,002%
MgO	0,01%
CaO	0,02%
Na <sub>2</sub> O	0,01%
Trazos inorgánicos	0,25%
Cloruros lixiviables	< 10 ppm

#### Propiedades Físicas Típicas

Color	Blanca
Límite de uso continuo *	1260°C
Punto de Fusión	1760°C
Diámetro de fibra (medio)	2,5 a 3,5 micrones
Longitud de fibra (medio)	100 mm
Densidad	2,73 g/cm <sup>3</sup>
Calor específico - 1100°C	1130 J/kg K

#### Disponibilidad

Las Mantas Durablanket están disponibles en las siguientes dimensiones:

Espesor	6, 13, 25, 38 e 51 mm
Ancho	610 e 1220 mm
Longitud	3660, 7620, 14640 e 21960 mm
Densidad	64, 96, 128, 160 e 192 kg/m <sup>3</sup>

\* Dimensiones especiales bajo consulta

\* El límite de uso continuo de los productos Fiberfrax está determinado por el criterio del cambio lineal irreversible y no por el punto de fusión.



## Aplicaciones Principales

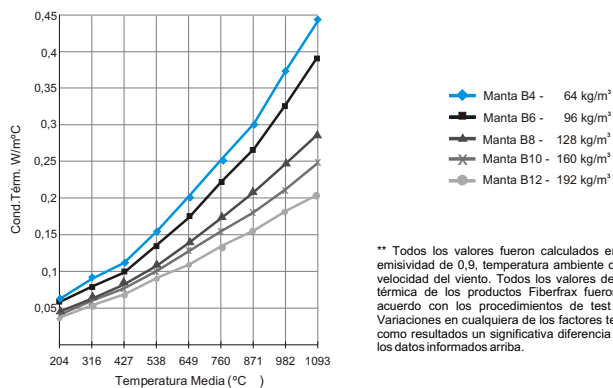
- Revestimiento de hornos continuos e intermitentes.
- Revestimiento de hornos de pirólisis y "heaters".
- Revestimiento de reformadores y calderas.
- Revestimiento de carros cerámicos de baja masa térmica.
- Aislamiento de tuberías flexibles (pyping).
- Aislamiento recuperable de turbinas de vapor y gas.
- Aislamiento de reactores.
- Aislación complementaria en hornos de altísimas temperaturas.
- Sellado de tapas en hornos pozo (soaking pitt).
- Sellado de campana de Hornos de recocido.
- Sellado y Juntas de altas temperaturas.
- Filtración en altas temperaturas.
- Revestimiento corta-fuego en decks, divisores y shafts.
- Aislamiento de puertas corta-fuego.
- Revestimiento termo-acústico.
- Substitución del amianto.
- Aislamiento complementario en hornos de vidrio.
- Sistemas removibles para alivio de tensiones.
- Aislamiento de equipamientos nucleares.

## Presentación

Las mantas Durablanket se proveen en cajas de cartón.

Espesor/Logitud (mm)	Piezas/caja	m <sup>2</sup> /caja	Dimensiones
6 x 21960	1	13,4	620 x 443 x 427
13 x 14640	1	8,93	620 x 443 x 427
25 x 7620	1	4,65	620 x 443 x 427
38 x 3660	1	2,23	620 x 443 x 427
51 x 3660	1	2,23	620 x 443 x 427

## Conductividad térmica vs temperatura media ( ASTM - C - 177 )\*\*



\*\* Todos los valores fueron calculados en un factor de emisividad de 0,9, temperatura ambiente de 27°C y cero velocidad del viento. Todos los valores de conductividad térmica de los productos Fiberfrax fueron medidos de acuerdo con los procedimientos de test ASTM-C-177. Variaciones en cualquiera de los factores testeados darán como resultados un significativa diferencia con relación a los datos informados arriba.



Las informaciones, recomendaciones y opiniones aquí contenidas son presentadas solamente para consideración, información y verificación. No deberán ser (en parte o en todo) entendidas como garantía o declaración por la que asumimos cualquier responsabilidad. Esto no deberá ser interpretado como licencia de uso, de patente ó marca.

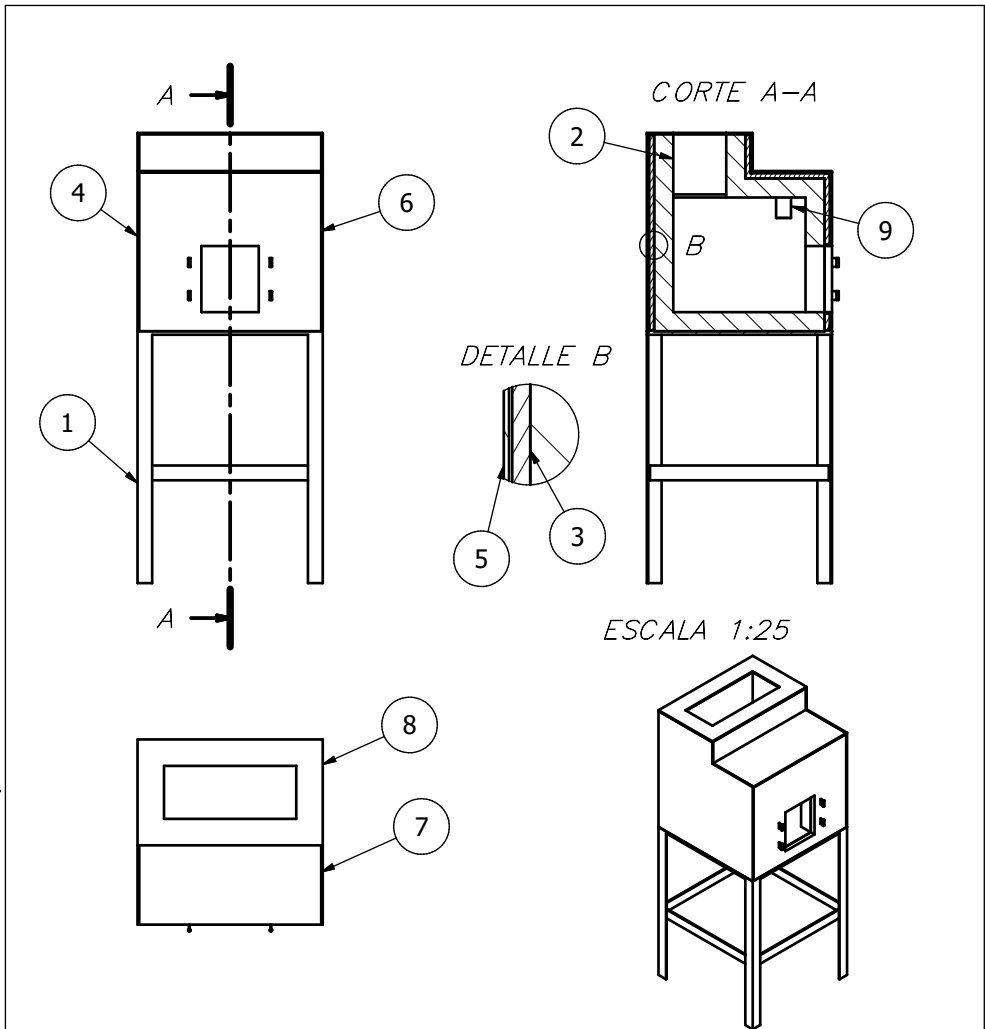
Unifrax Argentina  
Vicente Oviden 2150  
B 1832 MJJ - Lomas de Zamora  
Pcia. de Buenos Aires - Argentina.  
Phone: (54) 11 - 4231-7410 / 7148 / 7156  
Fax: (54) 11 - 4231-7362  
E-mail: info@unifrax.com.ar

Efectivo Julio / 2001

# Anexo 9: Dimensiones del horno propuesto

- A6  
148x105
- A5  
210x148
- A4  
297x210
- A3  
420x297
- A2  
594x420
- A1  
841x594
- A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



LISTA DE PIEZAS

ELEMENTO	CTDAD	DESCRIPCIÓN	MATERIAL
1	1	Base Estructural	Acero ASTM A36
2	1	Cámara Refractaria	Ladrillo Refractario
3	1	Aislante térmico	Manta Refractaria
4	2	Placa Lateral	Acero ASTM A36
5	1	Placa Posterior	Acero ASTM A36
6	1	Placa Frontal	Acero ASTM A36
7	1	Placa Superior Frontal	Acero ASTM A36
8	1	Placa Superior Posterior	Acero ASTM A36
9	2	Soplete	Acero Inoxidable

	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica	 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE MATRIZ CUENCA	
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025		

Proyección	 CONJUNTO HORNO	Escala: 1:18
		Lámina N° 1/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

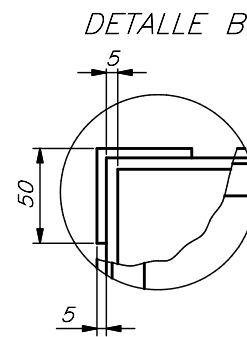
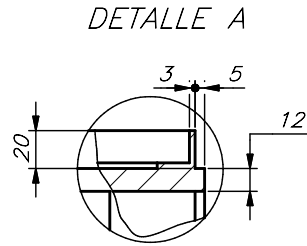
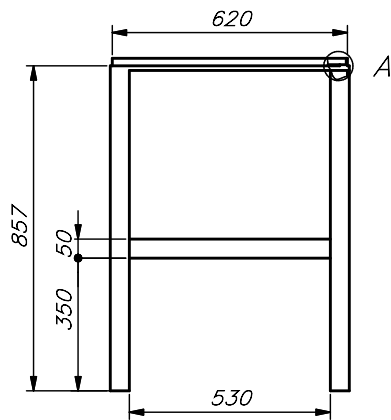
A3  
420x297

A2  
594x420

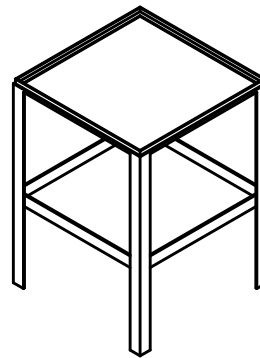
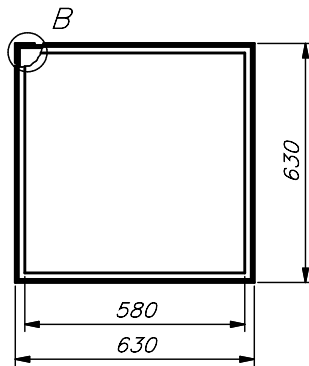
A1  
841x594



A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



ESCALA 1:20



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE		
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025	MATRIZ CUENCA		
Proyección	Base Estructural				Escala: 1:15
					Lámina N° 2/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

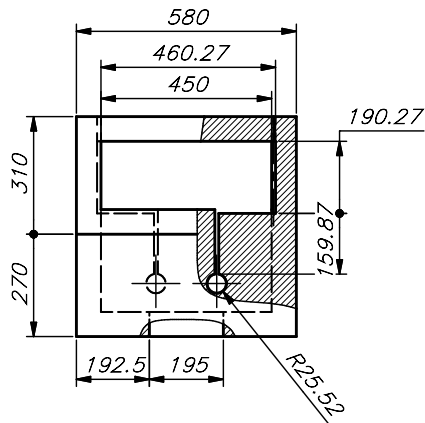
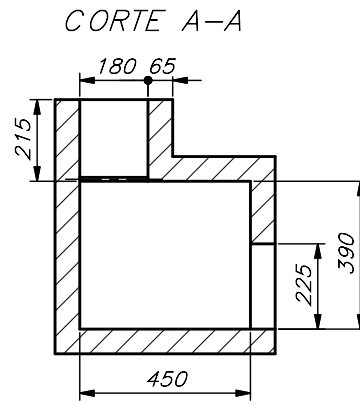
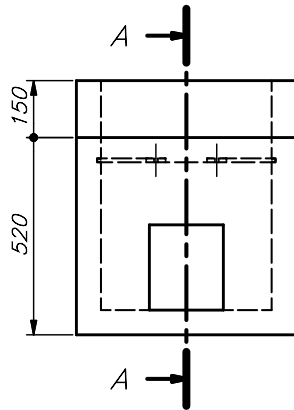
A3  
420x297

A2  
594x420

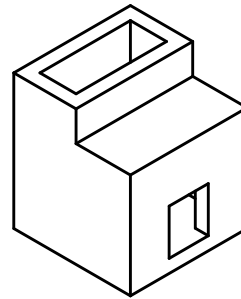
A1  
841x594



A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



ESCALA 1:20



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	MATRIZ CUENCA		
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025			
Proyección	Cámara Refractaria				Escala: 1:15
					Lámina N° 3/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

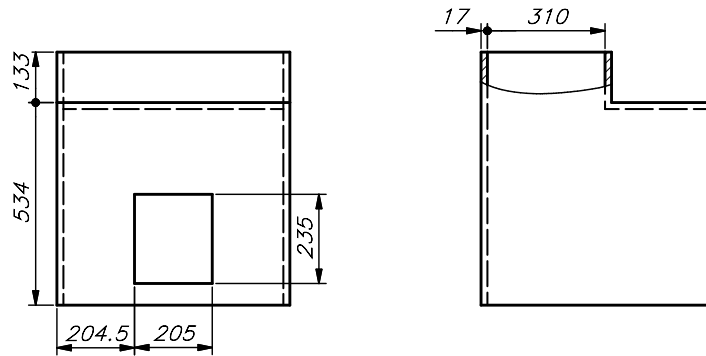
A3  
420x297

A2  
594x420

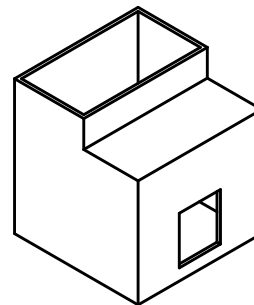
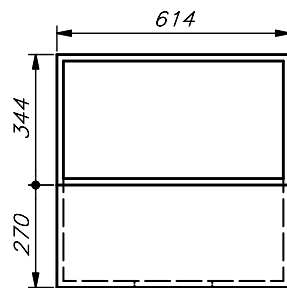
A1  
841x594

A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



ESCALA 1:20



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE MATRIZ CUENCA		
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025			
Proyección	Aislante Térmico				Escala: 1:15
					Lámina N° 4/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

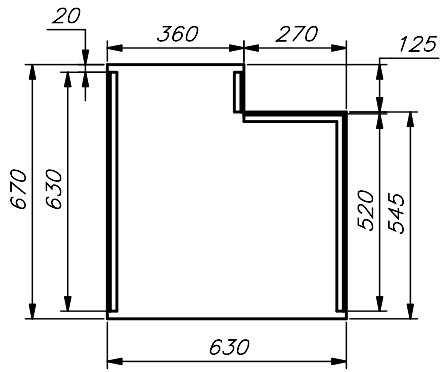
A3  
420x297

A2  
594x420

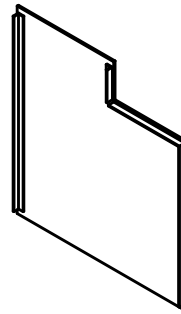
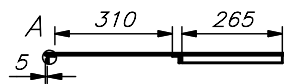
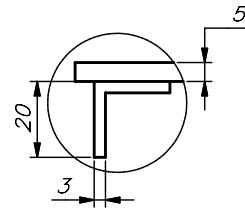
A1  
841x594

A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



DETALLE A



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE MATRIZ CUENCA		
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025			
Proyección	Placa Lateral				Escala: 1:15
					Lámina N° 5/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

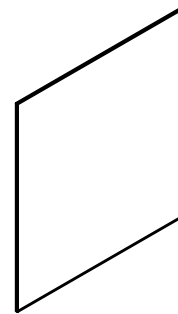
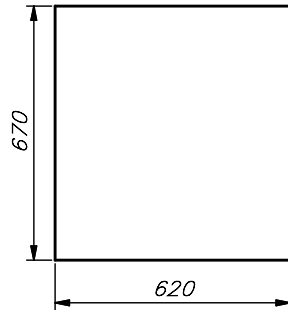
A3  
420x297

A2  
594x420

A1  
841x594

A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE		
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025	MATRIZ CUENCA		
Proyección	Placa Posterior				Escala: 1:15
					Lámina N° 6/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

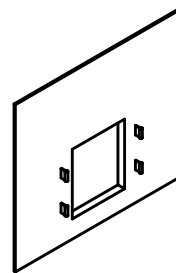
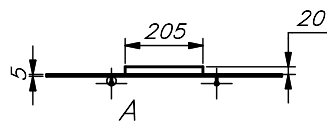
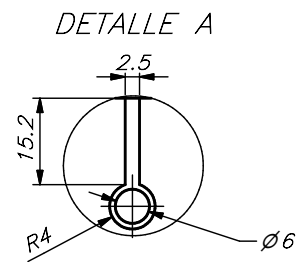
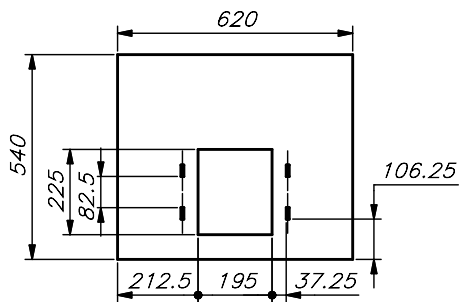
A3  
420x297

A2  
594x420

A1  
841x594

A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica	 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE	
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025	MATRIZ CUENCA	
Proyección	Placa Frontal			Escala: 1:15
				Lámina N° 7/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

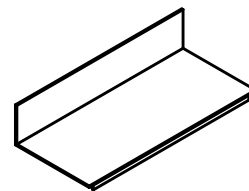
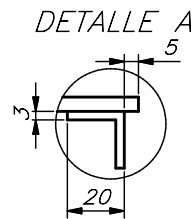
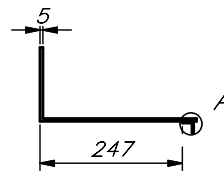
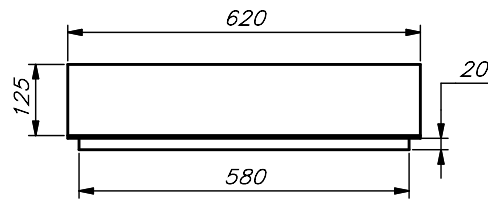
A3  
420x297


A2  
594x420

A1  
841x594

A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica	 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE	
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025	MATRIZ CUENCA	
Proyección	Placa Superior Frontal			Escala: 1:10
				Lámina N° 8/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

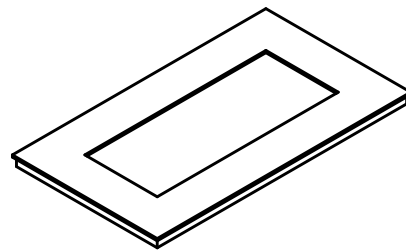
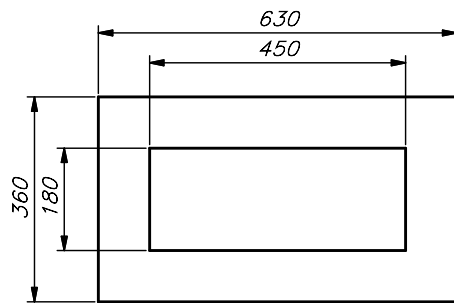
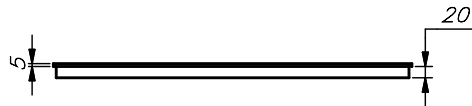
A3  
420x297

A2  
594x420

A1  
841x594

A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica		UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE		
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025	MATRIZ CUENCA		
Proyección	Placa Superior Posterior				Escala: 1:10
					Lámina N° 9/10

A6  
148x105

A5  
210x148

A4  
297x210

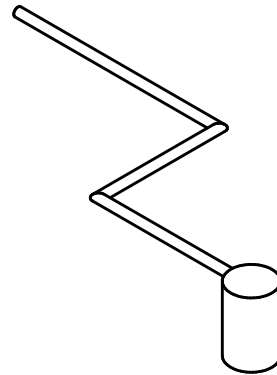
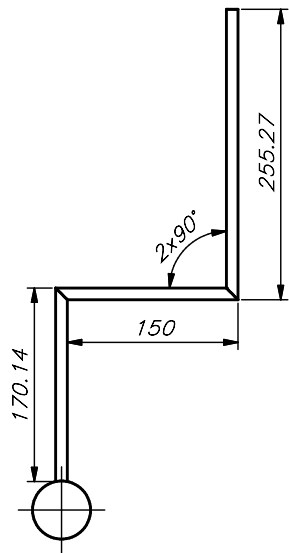
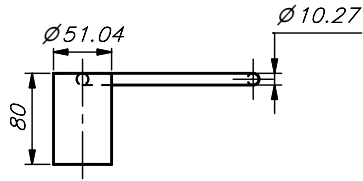
A3  
420x297



A2  
594x420

A1  
841x594

A0  
1189x841

Hoja de enseñanza Técnica



	Nombre	Fecha	Ingeniería Mecatrónica	 UNIVERSIDAD POLITECNICA SALESIANA
Dibujado	David Lupercio	24/07/2025	SEDE	
Comprobado	Ing. Diego Urgilés	24/07/2025	MATRIZ CUENCA	
Proyección	Soplete			Escala: 1:5
				Lámina N° 10/10

## Anexo 10: Propuesta Presupuestaria

### DATOS DEL CLIENTE

Nombre: Remibrass S.A.  
Dirección: Vía a Llacao, Azuay

Fecha: 29/07/2025

Concepto	Cantidad	Precio	Total
Materiales estructurales	1	\$ 450.75	\$ 450.75
Materiales sistemas de combustión	1	\$ 686.64	\$ 686.64
Materiales sistemas de control	1	\$ 337.81	\$ 337.81
Servicios	1	\$ 1 434.73	\$ 1 434.73
Costos indirectos	1	\$ 70.80	\$ 70.80
Forma de pago: Transferencia		Subtotal	\$ 2 980.73
Nota: El servicio tiene una validez de 30 días.		Contingencia (10 %)	\$ 298.07
		<b>Total</b>	<b>\$ 3 278.80</b>



Luis David Lupercio