

**Escuela Superior Politécnica del Litoral**

**Facultad de Ingeniería en Mecánica y Ciencias de la Producción**

Título del trabajo

Mejoras del proceso de fundición mediante rediseño de moldes y horno de fundición.

INGE-3102

**Proyecto Integrador**

Previo la obtención del Título de:

**Ingeniero Mecánico**

Presentado por:

Dixon Daniel Ortega Romero

Guayaquil - Ecuador

Año: 2025

## **Dedicatoria**

---

El presente proyecto es dedicado a Dios por brindarme la sabiduría, claridad y salud para llegar a este momento importante de mi vida. A mis padres, quienes han sido mi mayor fuente de fortaleza y equilibrio, que con su apoyo incondicional hicieron en cada etapa de este proceso, más motivacional. La perseverancia, el compromiso y el crecimiento personal es el reflejo que he construido gracias a ellos.

## Agradecimientos

---

Expreso mi sincero agradecimiento a todas las personas que contribuyeron a este desarrollo profesional. A mis tutores de tesis, por su guía académica, asesoría técnica y orientación constante durante cada etapa de esta investigación. A la ESPOL que facilitó todos los recursos y a los docentes por compartir a lo largo de la carrera sus conocimientos de nivel alto que significativamente aportaron a mi formación competente. Finalmente, agradezco a mi familia y personas que confiaron y apoyaron con firmeza para culminar esta etapa académica

## Declaración Expresa

---

Yo, Dixon Daniel Ortega Romero acuerdo y reconozco que:

La titularidad de los derechos patrimoniales de autor (derechos de autor) del proyecto de graduación corresponderá al autor o autores, sin perjuicio de lo cual la ESPOL recibe en este acto una licencia gratuita de plazo indefinido para el uso no comercial y comercial de la obra con facultad de sublicenciar, incluyendo la autorización para su divulgación, así como para la creación y uso de obras derivadas. En el caso de usos comerciales se respetará el porcentaje de participación en beneficios que corresponda a favor del autor o autores.

La titularidad total y exclusiva sobre los derechos patrimoniales de patente de invención, modelo de utilidad, diseño industrial, secreto industrial, software o información no divulgada que corresponda o pueda corresponder respecto de cualquier investigación, desarrollo tecnológico o invención realizada por mi durante el desarrollo del proyecto de graduación, pertenecerán de forma total, exclusiva e indivisible a la ESPOL, sin perjuicio del porcentaje que me corresponda de los beneficios económicos que la ESPOL reciba por la explotación de mi innovación, de ser el caso.

En los casos donde la Oficina de Transferencia de Resultados de investigación (OTRI) de la ESPOL comunique al autor que existe una innovación potencialmente patentable sobre los resultados del proyecto de graduación, no se realizará publicación o divulgación alguna, sin la autorización expresa y previa de la ESPOL.

Guayaquil, 15 de octubre del 2025.



---

Dixon Daniel Ortega Romero

## **Evaluadores**

---

**Miguel Ángel Quilambaqui Jara**

Profesor de Materia

P1

---

**Ernesto Rolando Martínez Lozano**

Tutor de proyecto

## **Resumen**

Este proyecto es dirigido a una empresa dedicada a fabricar accesorios para el riego mediante el proceso de fundición de aluminio, mecanizado y solda. El objetivo general tiene como desarrollo rediseñar moldes para mejorar eficiencia de producción, calidad y reducción de costos de fabricación; a su vez, mejorar estructuralmente el horno para garantizar una mayor seguridad del proceso y del producto. La hipótesis planteó un sistema monolítico enfocado en moldes de piezas de mayor productividad (acople para válvula paso de 6”), lo cual se realizó un análisis post-moldeo del proceso actual, posteriormente se aplicaron criterios técnicos y térmicos con el fin de facilitar la implementación de un mecanizado básico y no especializado; y en base a un evalúo térmico-estructural del horno actual, se definió un sistema multicapa, una tapa funcional y control de colada con termocupla tipo K, con el propósito de eliminar dependencia del criterio empírico del operario para la determinación visual de la temperatura de colada. Finalmente, se evidencia aumento del 70% en la producción mediante la implementación de piezas monolíticas, junto con un ahorro del 28.33% (USD11.33), una eficiencia mejorada del 85% frente al 15% del horno actual, estimándose 50 USD/mes de ahorro en consumo de combustible.

**Palabras Clave:** modernización, horno GLP, eficiencia, sobrecalentamiento, ahorro, dependencia.

### *Abstract*

This project is directed at a company dedicated to manufacturing irrigation accessories through aluminum casting, machining, and welding processes. The general objective focuses on redesigning molds to improve production efficiency, product quality, and the reduction of manufacturing costs; additionally, on structurally improving the furnace in order to ensure greater process and product safety. The hypothesis proposed a monolithic system focused on molds for higher-productivity components (6-inch valve coupling), for which a post-molding analysis of the current process was conducted; subsequently, technical and thermal criteria were applied in order to facilitate the implementation of basic, non-specialized machining. Furthermore, based on a thermal-structural evaluation of the existing furnace, a multilayer insulation system, a functional lid, and a pouring temperature control using a Type-K thermocouple were defined, with the purpose of eliminating dependence on the operator's empirical visual criterion for determining the pouring temperature. Finally, a 70% increase in production is evidenced through the implementation of monolithic components, together with a cost saving of 28.33% (USD 11.33), an improved efficiency of 85% compared to 15% for the existing furnace, and an estimated fuel consumption saving of USD 50 per month.

**Keywords:** modernization, LPG furnace, efficiency, mold redesign, overheating savings, operator dependence.

## Índice general

Resumen.....	VI
<i>Abstract</i> .....	VII
Índice general.....	VIII
Abreviaturas.....	XIII
Simbología.....	XIV
Índice de Figuras.....	XVI
Índice de tablas.....	XIX
Índice de planos.....	XXII
Capítulo 1.....	1
1. Introducción.....	2
1.1. Descripción del problema.....	2
1.2. Justificación del Problema.....	5
1.3. Objetivos.....	6
1.3.1. Objetivo general.....	6
1.3.2. Objetivos específicos.....	6
1.4. Marco teórico.....	7
1.4.1. Proceso de fundición de aluminio con moldeo de tierra.....	7
1.4.2. Fallas comunes en piezas elaboradas en fundición con aluminio.....	10

1.4.3.	Principios y uso de mazarota .....	12
1.4.4.	Funcionamiento de un horno a gas GLP para fundición de aluminio.....	15
1.4.5.	Controles térmicos fundamentales para temperatura de colada.....	16
1.4.6.	Pérdidas por transferencia de calor y eficiencia térmica .....	17
Capítulo 2.....		24
2.	Metodología.....	25
2.1.	Diagnóstico del proceso de elaboración en accesorios actuales .....	26
2.1.1.	Alternativa actual (brida y adaptador por separado).....	27
2.1.2.	Alternativa propuesta (brida y adaptador en conjunto).....	28
2.2.	Criterios de mejoras para los moldes .....	29
2.2.1.1.	Determinación de mazarota para nuevo diseño integrado .....	31
2.3.	Diagnóstico del funcionamiento, estructural y térmico del horno actual .....	32
2.3.1.	Determinación de calor para elevar la temperatura .....	35
2.3.2.	Determinación de calor para fusión .....	35
2.3.3.	Determinación de calor para vertido.....	35
2.3.4.	Determinación de la energía total de fusión para la carga .....	36
2.3.5.	Determinación del calor sobre el crisol .....	36
2.3.6.	Determinación de la energía total de la fundición .....	36
2.3.7.	Determinación de peso total y calor requerido por unidad de masa para el aluminio y el crisol en conjunto.....	36

2.3.8.	Determinación de la capacidad de calentamiento .....	37
2.3.9.	Análisis de calor, usando la analogía de resistencias eléctricas.....	38
2.3.10.	Análisis de transferencia de calor por conducción .....	39
2.3.11.	Análisis de transferencia de calor por convección.....	40
2.3.12.	Análisis de transferencia de calor por radiación .....	42
2.3.13.	Pérdida total de calor en el horno .....	43
2.3.14.	Determinación del calor total por medio de balance energético .....	44
2.3.15.	Determinación del consumo de combustible .....	45
2.3.16.	Determinación de la eficiencia del horno .....	45
2.4.	Requerimientos y alternativas de mejoras para el horno .....	45
2.4.1.	Consideración de dimensiones y selección de crisol .....	46
2.4.2.	Materiales aislantes para cuerpo, base y tapa del horno .....	48
2.4.3.	Selección de alternativas para tapa del horno .....	48
2.4.4.	Control térmico para la colada.....	50
Capítulo 3.....		52
3.	Resultados y análisis.....	53
3.1.	Análisis del proceso de moldeo independiente (Brida/Adaptador) .....	53
3.2.	Análisis del proceso productivo posterior del desmoldeo .....	54
3.3.	Análisis de requerimientos técnicos y térmicos para el moldeo .....	55
3.3.1.	Requerimientos de mazarota para punto caliente del molde monolítico .....	56

3.3.2.	Ubicación de la mazarota para el proceso de moldeo.....	58
3.4.	Resultados de costos como criterio para determinar ventajas productivas.....	58
3.5.	Resultados en modelado CAD (molde monolítico y pieza terminada).....	60
3.6.	Análisis del horno actual.....	61
3.6.1.	Análisis de cantidad de carga a fundir por tanda .....	62
3.6.2.	Entrada del flujo de llama (GLP).....	63
3.6.3.	Resultados de pérdidas de calor.....	64
3.6.4.	Resultados de energía útil y suministrada.....	64
3.6.5.	Resultados de eficiencia global del sistema actual .....	65
3.7.	Análisis de materiales del horno mejorado.....	66
3.8.	Análisis de crisol.....	70
3.8.1.	Ahorro energético útil.....	71
3.8.2.	Ahorro económico de GLP, según el crisol .....	72
3.8.3.	Costo de reparación de crisol A36.....	72
3.8.4.	Recuperación económica al reemplazar un crisol grafito-arcilla.....	73
3.9.	Especificaciones geométricas y correcciones estructurales .....	74
3.9.1.	Ingreso de llama al horno.....	74
3.9.2.	Incorporación de tapa.....	75
3.10.	Análisis térmico del horno mejorado.....	76
3.11.	Comparación en consumo de combustible (actual vs mejorado).....	78

3.12. Análisis para el control térmico de la colada .....	79
3.13. Resultado en modelado CAD del horno mejorado .....	80
Capítulo 4.....	82
4.1 Conclusiones y recomendaciones .....	83
4.1.1. Conclusiones.....	83
4.1.2 Recomendaciones .....	85
Referencias.....	86
Apéndice	

## **Abreviaturas**

ASME	American Society of Mechanical Engineers
ASTM	American Society for Testing and Materials
BAT	Best Available Techniques
DFM	Desing for Manufacturing
ESPOL	Escuela Superior Politécnica del Litoral
GLP	Gas Licuado de Petróleo
IEC	International Electrotechnical Commission
ISO	International Organization for Standardization
MIG	Metal Inert Gas
ODS	Objetivos de Desarrollo Sostenible
PCI	Poder Calorífico Inferior

## Simbología

m	Masa de carga
Al	Aluminio
Si	Silicio
Kg	Kilogramo
k	Conductividad térmica del material
$\nu$	Viscosidad cinemática del fluido
$\alpha$	Difusión térmica del fluido
$\beta$	Coefficiente de expansión volumétrica
T	Temperatura
Nu	Numero de Nusselt
Ra	Numero de Rayleigh
Pr	Número de Prandtl
$\sigma$	Constante de Stefan-Boltzman
$\dot{m}$	Flujo másico
$\varepsilon$	Emisividad de la superficie
R	Resistencia térmica
$L_f$	Calor latente de fusión
g	Aceleración de la gravedad
h	Coefficiente de transferencia de calor por convección
$c_p$	Calor específico
t	Tiempo

A	Área
V	Volumen
M	Modulo térmico
$\eta$	Eficiencia
R	Resistencia térmica
$\rho$	Densidad
$\Delta$	Desfase térmico

## Índice de figuras

Figura 1. 1 Válvula de paso tipo “mariposa” con acoples a tubería PVC de 6”.....	8
Figura 1. 2 Accesorios de aluminio implementado en un sistema de riego.....	8
Figura 1. 3 Diagrama esquemático entre arena y metal para la elaboración de una pieza.....	10
Figura 1. 4 Falla tipo esponjosa debido a sobrecalentamiento del aluminio derretido y humedad en la arena. .....	11
Figura 1. 5 1: contracción en zona gruesa. 2: contracción en unión .....	12
Figura 1. 6 Ilustración esquemática del llenado en un molde de tierra con su respectiva mazarota (riser) sin ocultar.....	13
Figura 1. 7 Ilustración real del llenado en un molde de tierra con su respectiva mazarota.....	13
Figura 1. 8 Esquema de los componentes básicos de un horno con quemador GLP .....	16
Figura 2. 1 Esquema metodológico.....	25
Figura 2. 2 Molde de brida y adaptador para acople de 6” (sistema por separado) .....	27
Figura 2. 3 Bosquejo de molde monolítico con interfaz unida integrada .....	28
Figura 2. 4 Registro de mediciones de moldes actuales.....	31
Figura 2. 5 Horno cilíndrico a gas GLP actual de la empresa.....	32
Figura 2. 6 Toma de mediciones del horno y el crisol (Apéndices B).....	34
Figura 2. 7 circuito de resistencias térmicas .....	38
Figura 3. 1 Moldeo en tierra de adaptador y brida de 6”.....	54
Figura 3. 2 Elaboración de acople de 6” posterior al desmoldeo.....	54
Figura 3. 3 Molde monolítico de basado en los requerimientos técnicos.....	56
Figura 3. 4 Sistema de alimentación del acople monolítico.....	58
Figura 3. 5 Molde monolítico y resultado de pieza fundida finalizada.....	60

Figura 3. 6 Materiales que componen el horno de fundición actual.....	61
Figura 3. 7 Esquema de las capas que componen el horno.....	61
Figura 3. 8 Entrada frontal de la llama.....	63
Figura 3. 9 Demostración física de líneas de calor de manera frontal hacia el horno actual.....	63
Figura 3. 10 Configuración multicapa (concreto, ladrillo aislante, fibra cerámica).....	67
Figura 3. 11 Configuración multicapa (concreto, ladrillo aislante, fibra cerámica y lana de roca).....	69
Figura 3. 12 Vista de capas térmicas del horno mejorado.....	70
Figura 3. 13 Reparación de base de crisol (afectación por reacción del aluminio y llama frontal del quemador).....	73
Figura 3. 14 Demostración física de líneas de calor de manera tangencial.....	74
Figura 3. 15 Tapa de horno con sistema de apertura mediante palanca.....	75
Figura 3. 16 Agujero central de 18cm, simulando chimenea.....	76
Figura 3. 17 Ubicación de termocupla a lo largo de la capa de ladrillo aislante.....	79
Figura 3. 18 Horno con estructura térmica mejorada, alimentación de calor tangencial, tapa integrada y control de temperatura.....	80
Figura B 1 Esquema de la mitad del horno formado por la capa refractaria y la lámina metálica	
Figura B 2 Esquema de resistencias térmicas para la base del horno	
Figura B 3 Esquema de resistencias térmicas para la base del horno	
Figura B 4 Esquema de resistencias térmicas para la parte superior del hornoCXXVI	
Figura D 1 Concreto refractario de alúmina Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (TUVAL, Ecuador)	
Figura D 2 Ficha técnica de concreto refractario concrax 1300°C (ERECOS, Colombia)CXXVIII	
Figura D 3 Ladrillo aislante tipo “ARCO 3” (TUVAL, Ecuador)CXXIX	
Figura D 4 Ficha técnica de ladrillo aislante 1400°C (ERECOS, Colombia)CXXX	
Figura D 5 Manta de fibra cerámica (TUVAL, Ecuador)	
Figura D 6 Ficha técnica de manta de fibra cerámica 1260°C (ERECOS, Colombia)	

Figura D 7 Lamina de acero al carbono A36 de 3mm (DIPAC, Ecuador)

Figura D 8 Ficha técnica de acero al carbono A36 (DIPAC, Ecuador)

Figura D 9 Panel de Lana de Roca 70 kg/m<sup>3</sup> (AISLANTES EC, Ecuador)

Figura D 10 Ficha técnica panel de lana de roca (AISLANTES EC, Ecuador)

Figura E 1 Esquema de las capas del horno constituida por cinco materiales

Figura E 2 Esquema de resistencias térmicas proporcionada por cada material

Figura F 1 Quemador de forja de propano tipo Venturi 100.00BTU≈29.3kW

Figura F 2 Ficha técnica de forja de propano tipo Venturi 100.00BTU≈29.3kW

Figura G 1 Controlador PID REX C-100 de RK Instruments (Tienda cerámica, Ecuador)

Figura G 2 Ficha técnica REX C-100 de RK Instruments

Figura G 3 Termocupla tipo K industrial THL TCK-BRRS01 (THERMOLASER, Perú)

Figura G 4 Ficha técnica THL TCK-BRRS01

## Índice de tablas

Tabla 2. 1 Ciclo de elaboración en un acople de 6", desde su preparación de chatarra, hasta el acabado final .....	26
Tabla 2. 2 Aspecto de mejoras del molde con sus características .....	28
Tabla 2. 3 Matriz de ponderación para criterios de diseño del molde .....	30
Tabla 2. 4 Matriz de selección de diseño del molde .....	30
Tabla 2. 5 "Checklist" para evaluación del horno actual .....	33
Tabla 2. 6 Matriz de ponderación para selección de crisol .....	47
Tabla 2. 7 Matriz de selección del crisol .....	47
Tabla 2. 8 Características de materiales de al menos tres capas .....	48
Tabla 2. 9 Matriz de ponderación para selección de tapa .....	50
Tabla 2. 10 Matriz de selección para tapa .....	50
Tabla 3. 1 Detalles de moldeo entre brida y adaptador .....	53
Tabla 3. 2 Análisis de valor del proceso actual .....	55
Tabla 3. 3 Resultados geométricos y térmicos por zona del acople monolítico .....	56
Tabla 3. 4 Resultados integrados del diseño de la mazarota para el modelo monolítico .....	57
Tabla 3. 5 Análisis técnico-económico del proceso por separado y monolítico .....	59
Tabla 3. 6 Resultado de carga de aluminio por tanta en función de la capacidad efectiva del crisol .....	62
Tabla 3. 7 Resultados de pérdidas de calor del horno actual .....	64
Tabla 3. 8 Resultados de calor útil para el proceso de fusión .....	65
Tabla 3. 9 Resultado de potencia útil de fundición .....	65
Tabla 3. 10 Resultados para espesores disponibles de mantas (25mm,38mm y 51mm) .....	68
Tabla 3. 11 Resultados de energías útiles por colada según material de crisol .....	71

Tabla 3. 12 Resultados de ahorro de combustible y costo por tipo de crisol .....	72
Tabla 3. 13 Resultados geométricos del horno mejorado .....	74
Tabla 3. 14 Balance térmico de potencia en un tiempo de 60 minutos.....	77
Tabla 3. 15 Resultados de pérdidas de calor del horno mejorado.....	77
Tabla 3. 16 Consumo de GLP y ahorro con 16 días al mes .....	78
Tabla 3.17 Costo materiales para el horno mejorado.....	81
Tabla A 1 Medidas ajustadas para el molde de la brida	
Tabla A 2 Medidas ajustadas para el molde del adaptador	
Tabla A 3 Costos adicionales involucrados en el proceso (suelta y corte de sección)	
Tabla B 1 Registro de datos dimensionales del horno	
Tabla B 2 Registro de datos dimensionales del crisol	
Tabla B 3 Propiedades empleadas en el análisis térmico del proceso de fundición	
Tabla B 4 Datos de operación para una carga de 33.33kg (Al)	
Tabla B 5 Propiedades del aire a la presión de 1atm	
Tabla B 6 Resultados de las propiedades del aire a una temperatura de película de 147.5°C generada en el cuerpo del horno	
Tabla B 7 Resultados de las propiedades del aire a una temperatura de película de 335.5°C generada en el cuerpo del horno	
Tabla C 1 Propiedades empleadas en el análisis comparativo de crisoles	
Tabla D 1 Propiedades de concreto (concreto refractario)	
Tabla D 2 Propiedades de ladrillo aislante refractario 1400°C	
Tabla D 3 Propiedades de manta de fibra cerámica 1260°C	
Tabla D 4 Propiedades de acero A36	
Tabla D 5 Propiedades del aire a una temperatura de película de 35.15°C	
Tabla D 6 Valores de temperatura para espesor de manta disponibles	

Tabla D 7 Valores de temperatura para espesor de manta disponibles

Tabla E 1 Registro de datos dimensionales del horno mejorado

Tabla E 2 Registro de datos dimensionales del crisol

## Índice de planos

**Plano 1** Molde externo

**Plano 2** Pieza Final

**Plano 3** Horno tapa

**Plano 4** Horno

## **Capítulo 1**

## **1. Introducción**

### **1.1. Descripción del problema**

La implementación de mejoras en el diseño de moldes y en el horno de fundición se justifica a partir de las ineficiencias técnicas, económicas y operativas identificadas en el proceso actual de fabricación de muchas piezas, pero nos centraremos en los acoples para válvulas de paso de 6". En la configuración productiva vigente, estos componentes se elaboran como piezas separadas que requieren operaciones post-moldeo de corte y soldadura para lograr su unión coaxial entre el adaptador y la brida. Dichas operaciones demandan el uso de herramientas adicionales como pulidora y equipo de soldadura MIG, así como la intervención de personal calificado, lo que incrementa el tiempo de ciclo y los costos operativos. De manera referencial, el proceso de soldadura y de corte representa un costo adicional aproximado de USD11, equivalente a un 27% del valor comercial del producto (USD 40). Reduciendo significativamente la competitividad del proceso frente al mercado.

Por otro lado, el deterioro estructural del horno asociado a su antigüedad genera una elevada disipación de calor hacia el ambiente y un bajo aprovechamiento energético. El consumo de gas diario para aproximadamente 200 lb llega a casi 3 cilindros (15kg cada uno), resultando una cantidad elevada. Esta condición no solo incrementa el consumo de combustible, sino que también representa un riesgo para los operadores debido a la alta carga térmica liberada durante la operación, afectando la seguridad del proceso. Adicionalmente, la ausencia de un sistema de control de temperatura de la colada obliga a depender estrictamente del criterio empírico y visual de un operario para determinar el momento adecuado del vertido. Esta práctica ha provocado episodios recurrentes de sobrecalentamiento del metal, favoreciendo la formación de porosidad tanto superficial como interna en las piezas fundidas.

Un aspecto crítico del problema es que estos defectos no siempre son detectables durante la inspección visual inicial, ya que la porosidad puede permanecer latente dentro de la estructura de la pieza. En varios casos, la falla se manifiesta únicamente cuando la pieza es instalada en el sistema de riego y sometida a presión hidráulica, evidenciándose mediante microfugas o “sudado” del material. Esta situación genera reparaciones correctivas y reemplazo de componentes, incrementando los costos indirectos y afectando la confiabilidad del producto y la empresa.

Desde el punto de vista normativo, el proyecto se alinea con los principios de la **ISO 9001:2015**, al fortalecer el control del proceso productivo, reducir la variabilidad asociada a criterios empíricos y prevenir defectos que afectan la calidad del producto en servicio. Asimismo, se vincula con la **ISO 14001:2015**, al promover una mayor eficiencia energética del horno, disminuir el consumo de combustible y reducir la disipación innecesaria de calor al ambiente, contribuyendo a una operación más sostenible.

Basándose en la descripción del problema, se consideraron los siguientes aspectos de diseño más importantes:

**Salud pública:** El rediseño de moldes evitará usar el proceso de soldadura y el exceso de cortes de las piezas, ayudando evitar problemas de ruido, respiratorios, daño pulmonar, afectaciones a los ojos, nariz y garganta. Las mejoras del horno disminuirán gases como el hidrogeno ( $H_2$ ), debido a la reacción del aluminio con la humedad, dióxido de carbono ( $CO_2$ ) y óxidos de nitrógeno ( $NO_x$ ) que puede ser liberado por las impurezas que presentan el aluminio en forma de chatarra. Esto repercute en la salud pública minimizando riesgos de enfermedades respiratorias y exposición a contaminantes metálicos.

**Seguridad y bienestar:** La seguridad y bienestar siempre será una prioridad en el ámbito industrial. El proyecto nos fomenta un entorno laboral más práctico, saludable y seguro, haciendo énfasis en los principios de la norma ISO 45001, basada en la mejoría continua para crear lugares de trabajos seguros y saludables.

**Aspectos Globales:** El proyecto se intenta alinear con una tendencia internacional, que conlleva a optimizar recursos, reducir la huella de carbono y elevar la calidad del producto. Las grandes industrias metalúrgicas están orientadas a un proceso de alta eficiencia energética, sostenibilidad ambiental e innovación tecnológica, y es por lo que se requiere de la adopción de un nivel competitivo para adentrarse al mercado global de manufactura metálica.

Los objetivos de desarrollo sostenible (ODS) se centran en:

ODS 8: Trabajo decente y crecimiento económico.

ODS 9. Industria, innovación e infraestructura.

ODS 12: Producción y consumo responsable.

**Aspectos Sociales:** El punto social en este proyecto es generar beneficios para la comunidad, promoviendo condiciones laborales mejoradas e incrementar la capacitación del personal al usar nuevas tecnologías e innovaciones.

Asimismo, refuerza el compromiso social empresarial al proteger la integridad de los trabajadores y contribuir al desarrollo sustentable de la comunidad.

**Aspectos Ambientales:** La fundición de aluminio representa un impacto ambiental dando un reto principal a las industrias.

Mejorando el sistema y el horno de fundición permitirá reducir significativamente las emisiones contaminantes, aislamiento térmico y combustión más eficiente. Asimismo, el manejo correcto y responsable de las escorias y residuos sólidos que se generan.

El ruido por el proceso de mecanizado y gases de la soldadura es lo que se pretende reducir al implementar nuevos diseños para los moldes. Aliviando la contaminación acústica, reduciendo el volumen de desechos y eliminando la liberación de óxidos metálicos y vapores generados por la soldadura de aluminio.

**Aspectos económicos:** Las mejoras técnicas propuestas representan una reducción de consumo de combustible y los procesos de mecanizado que se requieren para la fabricación de las piezas, esto nos genera menores costos operativos y mayor rentabilidad. Además, el incremento de la calidad del producto final permitirá acceder a nuevos mercados industriales y exportaciones.

**Aspectos Técnicos:** Este proyecto se fundamenta en principios de ingeniería térmica, diseño mecánico y manufactura. La geometría optimizada del molde nos ayuda a simplificar procesos de mecanización y un mejor acabado en el producto final. En cuanto a las mejoras técnicas del horno de fundición, se busca brindar un mejor control de temperatura y aislamiento estructural.

## **1.2. Justificación del Problema**

Este proyecto se justifica por la necesidad de optimizar el proceso de fabricación de acoples para válvulas de paso de 6", mediante mejoras en el diseño de moldes y el horno de fundición, con el fin de incrementar la eficiencia productiva, la calidad del producto y la seguridad operativa. La configuración actual del proceso requiere operaciones post-moldeo de corte y soldadura para unión coaxial de componentes, lo que incrementa el tiempo de ciclo, los costos

operativos y dependencia de mano de obra calificada, afectando la competitividad del producto en el mercado.

Así mismo, el proyecto se justifica desde el punto de vista energético y operativo, debido al deterioro estructural del horno de fundición, el cual presenta una elevada disipación de calor y un consumo excesivo de combustible, generando riesgos para los operadores y un bajo aprovechamiento energético. La ausencia de control de temperatura durante la colada ha favorecido la aparición de defectos metalúrgicos, principalmente porosidad, que afectan la confiabilidad del producto en servicio

Finalmente, el proyecto se alinea con los principios de la ISO 9001:2015, al favorecer el control del proceso y la prevención de defectos, y con la ISO 14001:2015, al promover una operación más eficiente y sostenible desde el punto de vista energético.

### **1.3. Objetivos**

#### **1.3.1. Objetivo general**

Optimizar la producción de accesorios mediante rediseños de moldes, junto con el fortalecimiento estructural del horno de fundición alcanzando niveles de eficiencia productiva y seguridad industrial.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

1. Mejorar moldes de acoples para válvulas de paso de 6 pulgadas mediante diseño de moldeo monolítico que permita obtener piezas completas sin necesidad de soldadura.
2. Comparar los procesos de fundición y mecanizado con las nuevas mejoras, empleando análisis de costos como criterio de contraste para determinar ventajas productivas.

3. Evaluar el desempeño del horno actual en función de criterios técnicos y térmicos, incorporando mejoras térmicas.
4. Establecer un control de temperatura que mitigue el riesgo de sobrecalentamiento del metal para fortalecer la calidad de las piezas.

## **1.4. Marco teórico**

### **1.4.1. Proceso de fundición de aluminio con molde de tierra**

Primero partimos con conceptos básicos del aluminio, su importancia en el reciclaje y la industria del riego.

#### Reciclaje y sostenibilidad del aluminio

El aluminio es altamente un material reciclable, ahorrando aproximadamente un 95% de energía frente a la producción primaria. Informes sectoriales 2023-2025 corroboran que el reciclable es el puente principal de descarbonización del aluminio debido a sus mejoras en huella y eficiencia energética a nivel mundial (International Aluminium institute, 2024).

#### ¿Por qué el aluminio es recomendable en la industria del riego?

El aluminio y sus aleaciones aportan un peso reducido, lo cual nos facilita una instalación de accesorios para el riego. Ayudando también a su mantenimiento y traslado a diferentes campos agrícolas y debido a su mecanizado ágil nos permite mantener geometrías precisas, en la cual lo vuelve un mejor recurso en comparación a metales más pesados y propensos al óxido (Fabris et al., 2024).

**Figura1. 1**

*Válvula de paso tipo “mariposa” con acoples a tubería PVC de 6”*



**Figura1. 2**

*Accesorios de aluminio implementado en un sistema de riego*



*Nota.* La figura proporcionada por la empresa muestra una succión de 10 a 8" y una descarga de 6 a 8".

## Elaboración de una pieza de aluminio con moldeo de tierra

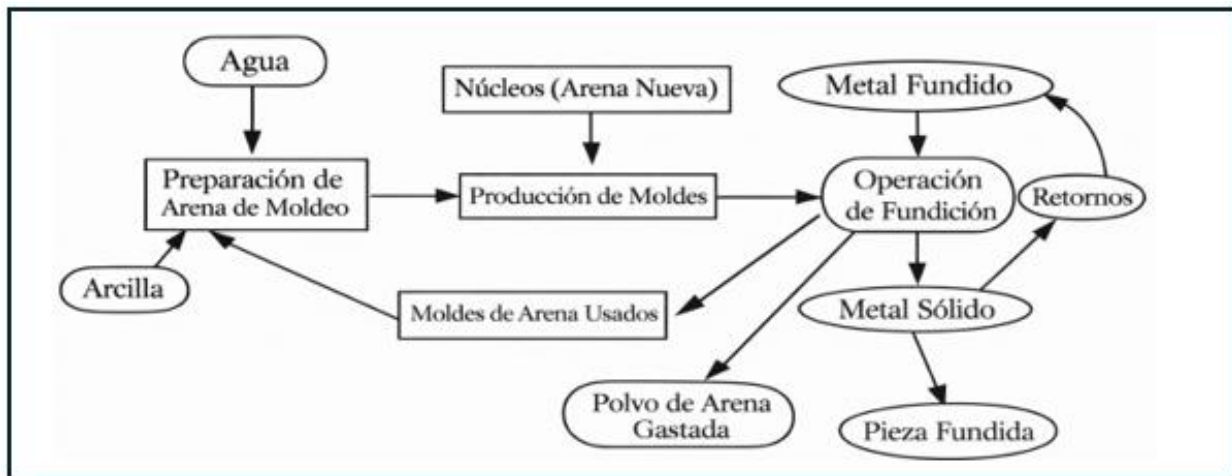
La fundición con moldes de tierra tiene un proceso de manufactura donde el metal se lleva al estado líquido, se vierte en un molde de geometría negativa de la pieza y se solidifica hasta obtener la forma final. El moldeo con arena es un proceso usado a nivel mundial, su versatilidad permite producir piezas de varias medias y también adaptarse a geometrías irregulares.

El ciclo se da mediante los siguientes pasos:

- Selección de la carga, esta puede ser chatarra de aluminio (se debe estar limpia y seca).
- Se verifica que el tren de gas funcione de manera correcta, como encendido seguro y detección de llama.
- Se procede a realizar el moldeo de tierra, colocando el molde deseado, incorporando un sistema de llenado, ajustando la humedad de tierra, (2–4 % H<sub>2</sub>O) dependiendo de la pieza (gruesa/delgada)
- Una vez preparada la colada con una temperatura ideal para el llenado, se vierte suave y con baja turbulencia para reducir H<sub>2</sub>. Hay que señalar que la calidad de vaciado depende de la temperatura de colada (700-750°C) y la limpieza del metal.
- Para finalizar, se realiza el desmoldeo para retirar toda tierra sobre la superficie de la pieza y posteriormente esperar su enfriamiento.

**Figura 1. 3**

*Diagrama esquemático entre arena y metal para la elaboración de una pieza*



*Nota.* Obtenido de Karl B. Rundman, 2015.

#### **1.4.2. Fallas comunes en piezas elaboradas en fundición con aluminio**

En el proceso de fundición con aluminio reciclado se pueden presentar dos principales fallas más comunes que dependen de las temperaturas de operación para la colada:

##### Falla de porosidad por gas ( $H_2$ )

Presenta una apariencia de forma esponjosa en el acabado, ocasionando poros finos dispersos. Se origina cuando el hidrogeno disuelto en la colada se sobresatura en la solidificación y brota como burbujas. El riesgo aumenta por un supercalentamiento del metal derretido y humedad en la arena (Liu et al., 2024).

**Figura1. 4**

*Falla tipo esponjosa debido a sobrecalentamiento del aluminio derretido y humedad en la arena.*



*Nota.* Codo de 8pulg con 45° para aplicaciones de succiones y descargas.

#### Falla por contracción (rechupes)

El rechupe es una cavidad visible generada por la contracción del metal cuando se solidifica, concentrándose en las zonas lejanas a la del sistema de llenado. Esto es causado por una falta de alimentación extra, la cual ayuda a complementar la contracción volumétrica durante el enfriamiento. Estas fallas son comunes en zonas gruesas o en uniones de las piezas.

**Figura1. 5**

*1: contracción en zona gruesa. 2: contracción en unión*



*Nota.* Brida de unión de 10pulg [1]. Unión de bocín-brida de 4pulg [2] (2025).

### **1.4.3. Principios y uso de mazarota**

La mazarota (riser) es un reservorio de metal líquido que sirve para compensar la contracción también llamado rechupe, que se genera durante la solidificación. Este reservorio se ubica cerca del punto de interés o de mayor temperatura, y debe solidificarse después de la zona crítica para que tenga un correcto funcionamiento

**Figura1. 6**

*Ilustración esquemática del llenado en un molde de tierra con su respectiva mazarota (riser) sin ocultar*



*Nota.* Obtenido de IQS Directory, 2024.

**Figura1. 7**

*Ilustración real del llenado en un molde de tierra con su respectiva mazarota*



*Nota.* La parte izquierda (amarillo) muestra la mazarota sin ocultar ubicada en la parte crítica de la pieza y la parte derecha (rojo) muestra la llenadera.

### Criterio de Chvoriov

Chvoriov indica que el tiempo  $t$  de solidificación crece con el módulo térmico  $M$  (ecu 2), por lo que en zonas con mayor módulo tienen mayor riesgo de rechufe, ya que tiende a endurecerse al final. Esto fundamenta que la mazarota debe tener un módulo mayor a la sección crítica ( $M_m \geq 1.2M_{zona}$ ), para que solidifique al final y alimente la contracción. Aplicaciones recientes siguen usando la ley como base para la solución del problema (Gómez Escandell et al. 2021).

$$t_{s,m} > t_{s,zona}$$
$$t_s = c_m \left(\frac{V}{A}\right)^n \text{ [s]} \quad (1.1)$$

$$M = \frac{V}{A} \text{ [m]} \quad (1.2)$$

Donde:

$t_s$ : tiempo de solidificación [s]

$M$ : módulo de solidificación de la pieza [m]

$c_m$ : constante de molde

$V$ : volumen del material [m<sup>3</sup>]

A: área de superficie de la pieza en contacto con el molde [m<sup>2</sup>]

n: aproximadamente a 2 para moldeo de arena

#### **1.4.4. Funcionamiento de un horno a gas GLP para fundición de aluminio**

Un horno para fundición de aluminio que funciona con GLP es un tipo de horno que funciona con llama controlada, se compone de una cámara con material refractario resistentes al calor, un quemador modulante, chimenea y sensores (T°, O<sub>2</sub>, presión). El gas usado como combustible está compuesto por 60% propano y 40% butano, es ideal para trabajos de este aspecto por su disponibilidad.

El ciclo de fundición en un horno GLP abarca encendido-fusión-supercalentamiento-filtrado-vertido, con los límites correspondientes de supertemperatura conforme normas de seguridad vigentes (**NFPA 86: 2023; ISO 13577-4:2022**). El control de la temperatura de la colada y la limpieza, condicionan defectos en el resultado final de la pieza.

##### Partes y características

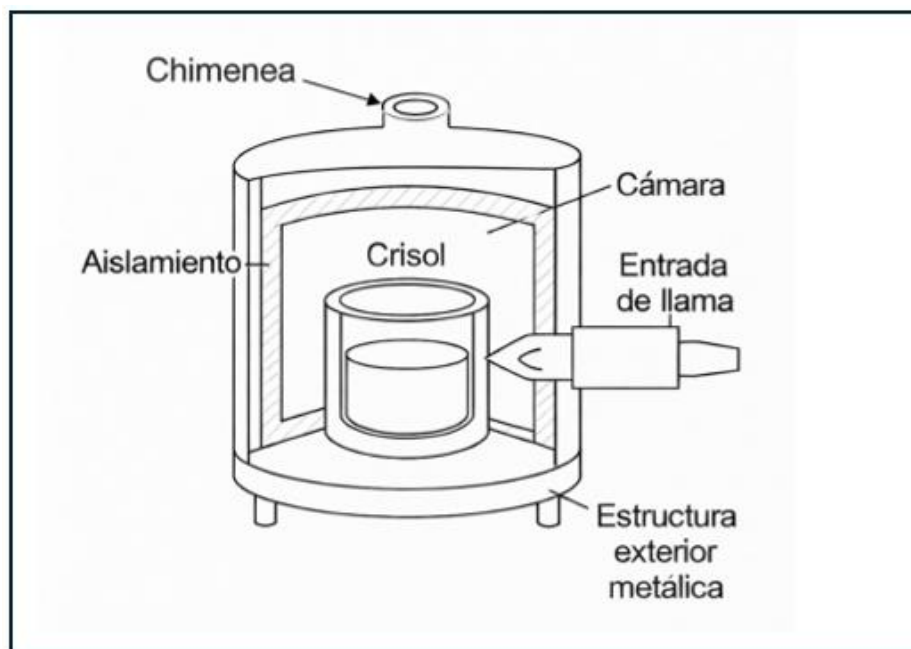
Son claves los componentes a la hora de diseñar un horno de fundición, partiendo desde su estructura exterior, hasta el interior.

- a) *Aislamiento térmico*, sin duda es una de las partes más esenciales al tener como función reducir pérdidas de calor, mejorando la eficiencia y mantener temperaturas ideales del metal. Estas varían entre ladrillos refractarios, fibras cerámicas de alta temperatura.
- b) *Cámara de combustión*, diseñada con el volumen correcto para que la combustión tenga contacto térmico con el crisol donde estará el metal. Debe estar compuesta por una entrada de llama, espacio para que circulen los gases calientes, una tapara en la parte superior y una salida para evacuación de humos.

- c) *Recipiente de fundición o crisol*, debe estar compuesto por material refractario resistentes a temperaturas de sobrecalentamiento del metal, a desgaste por flujo de metal y a corrosión térmica.

**Figura1. 8**

*Esquema de los componentes básicos de un horno con quemador GLP*



#### **1.4.5. Controles térmicos fundamentales para temperatura de colada**

Los controles térmicos tienen como finalidad mejorar sus propiedades mecánicas del metal, para evitar defectos en las piezas como grietas, porosidades y contracciones que se generan por un control deficiente de la temperatura de colada (AFS,2023).

#### Sanidad metalúrgica

Cuanto mayor es la temperatura y el tiempo de colada, aumentará la absorción de hidrogeno, esto favorecerá la degradación de la película de óxido, lo que eleva la porosidad y

defectos de cavidad. El control estricto de temperatura reduce la captación de H<sub>2</sub> y mejora la limpieza del metal (Yang et al., 2023; Liu et al., 2024).

### Sensores de temperatura

Los sensores de temperatura ayudan a controlar la calidad del material fundido. Estos pueden ser:

- *Termopares/termocuplas*, sensores miden temperaturas de altos rangos con contacto directo hacia al metal (Omega Engineering, 2025).
- *Pirómetros*, miden radiación infrarroja emitida por un objeto a una distancia y sin necesidad de contacto (Tempsens Instruments, 2024).

#### **1.4.6. Pérdidas por transferencia de calor y eficiencia térmica**

El rendimiento de un sistema térmico de un horno de a gas está basado en su eficiencia térmica. Es muy importante conocer los tipos de pérdidas por transferencia de calor que se expone mi sistema, conocer la temperatura que será expuesto para la fusión del metal y en paralelo mantener controles de temperatura.

### Transferencia de calor por conducción

Se define que “la conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. Puede darse en sólidos, líquidos o gases” (Çengel & Ghajar, 2020, p.18).

Su relación matemática está relacionada con la Ley de Fourier que relaciona:

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dx} \text{ [W]} \quad (1.3)$$

- Conducción de calor en cilindros (modelo del horno)

A partir de la ley de Fourier de la conducción del calor para la transferencia de calor a través de la capa cilíndrica, se puede expresar como:

$$Q_{\text{cond}} = -kA \frac{dT}{dr} \text{ [W]} \quad (1.4)$$

Donde el área ( $A = 2\pi rL$ ) va a depender de  $r$  y, en consecuencia, varía en la dirección de la transferencia de calor. Integrando desde  $r = r_1$  donde  $T(r_1) = T_1$ , hasta  $r = r_2$ , donde  $T(r_2) = T_2$ , da (Çengel & Ghajar, 2020, p.154):

$$Q_{\text{cond,cil}} = 2\pi Lk \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \text{ [W]} \quad (1.5)$$

Dado que  $\dot{Q}_{\text{cond,cil}}$  es constante, se puede expresar de la siguiente forma:

$$Q_{\text{cond,cil}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{cil}}} \text{ [W]} \quad (1.6)$$

Expresando la resistencia térmica de la capa cilíndrica,  $R_{\text{cil}}$ , en función de los radios, tenemos:

$$R_{\text{cil}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk} \text{ [}^\circ\text{C/W]} \quad (1.7)$$

Donde:

$r_1$ : radio interior [m]

$r_2$ : radio exterior [m]

L: longitud del cilindro [m]

k: conductividad térmica del material [ $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ]

### **Transferencia de calor por convección**

Se define que “la convección es el modo de transferencia de energía entre una superficie sólida y el líquido o gas adyacente que está en movimiento y comprende los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos” (Çengel & Ghajar, 2020, p.26)

Su relación matemática está relacionada con la Ley de Newton del enfriamiento:

$$Q_{\text{conv}} = hA_s(T_s - T_\infty) \text{ [W]} \quad (1.8)$$

Donde:

h : coeficiente de transferencia de calor por convección [ $\text{W/m}^2\cdot^\circ\text{C}$ ]

$A_s$  : área superficial de transferencia de calor por convección [ $\text{m}^2$ ]

$T_s$  : temperatura de superficie [ $^\circ\text{C}$ ]

$T_\infty$ : temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie [ $^\circ\text{C}$ ]

- Número de Reyleig (Ra) para transferencia de calor por convención natural

Es el producto del número de Grashof y el número Prandtl, también expresada de la siguiente manera:

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha} \quad (1.9)$$

Donde:

$\nu$ : viscosidad cinemática del fluido [ $m^2/s$ ]

$\alpha$ : difusión térmica del fluido [ $m^2/s$ ]

$g$ : aceleración de la gravedad [ $m/s^2$ ]

$\beta$ : coeficiente de expansión volumétrica [ $K^{-1}$ ]

$\Delta T$ : diferencia de temperatura entre fluido y el entorno [K]

$L$ : longitud característica del sistema [m]

- Número de Nusselt (Nu) para cilindro vertical y placa horizontal

Es el coeficiente adimensional de transferencia de calor por convención, se la puede expresar en base al número de Rayleigh (Ra) y el número de Prandtl (Pr) (Çengel & Ghajar, 2020):

$$Nu_{ccuerp} = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_{cuerp}^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr_{cuerp}} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 ; Ra \geq 10^9 \quad (1.10)$$

$$Nu_{sup} = 0.54Ra^{1/4}; Ra_{sup} \geq 10^7 \quad (1.11)$$

También se la puede expresar en función de la longitud característica del horno y la conductividad térmica del fluido:

$$\text{Nu} = \frac{hL_c}{k} \quad (1.12)$$

### **Transferencia de calor por radiación**

Se define que “la transferencia por radiación, a diferencia de la conducción y la convección, no requiere la presencia de un medio interventor, esta es emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas. Este tipo de transferencia de calor es la más rápida (a velocidad de la luz) y no sufre atenuación en el vacío.” (Çengel & Ghajar, 2020, p.28)

Su relación matemática está relacionada por la Ley de Stefan-Boltzmann:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_s T_s^4 \text{ [W]} \quad (1.13)$$

Donde:

$\varepsilon$  : emisividad de la superficie,  $0 \leq \varepsilon \leq 1$

$\sigma$ : constante de Stefan-Boltzman ( $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$ )

### **Calor útil requerida por el aluminio para fundirlo (sólido, latente y vertido)**

Se determinan mediante los siguientes parámetros:

- Calor recibido por el metal en estado sólido y punto de vertido (metal líquido), dada por la siguiente expresión (Mills,1999):

$$q_{s,v} = m_{Al} \cdot c_{ps,v} (T_2 - T_1) \text{ [J]} \quad (1.14)$$

Donde:

$m_{Al}$ : masa del aluminio [kg]

$c_p$ : calor específico, puede ser para el estado sólido o líquido [kJ/kg·K]

$(T_2 - T_1)$ : diferencia de temperatura según el estado físico del aluminio [°C]

- Calor de fusión del aluminio:

$$q_L = m_{Al} \cdot L_f \text{ [J]} \quad (1.15)$$

Donde:

$L_f$ : calor latente de fusión del aluminio (kJ/kg)

Por lo que la energía útil requerida para la fusión del metal es:

$$Q_{\text{útil,fusión}} = q_s + q_L + q_v \text{ [J]} \quad (1.16)$$

### **Calor útil de fundición**

Representa la energía necesaria que debe tener el aluminio y el crisol para fundir la carga.

Esta expresada por la siguiente sumatoria:

$$Q_{\text{útil,fundición}} = Q_{\text{útil,fusión}} + Q_{\text{crisol}} \text{ [J]} \quad (1.17)$$

### **Calor total del proceso**

Para analizar la energía térmico total del horno, consideramos la energía útil para el metal y la energía expuestas en todas las paredes del horno. Se expresa de la siguiente manera:

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{útil,fundición}} + Q_{\text{paredes}} \text{ [J]} \quad (1.18)$$

### **Consumo combustible (gas GLP domestico)**

Para mantener el horno en correcto funcionamiento se requiere saber la energía total consumida por el combustible, la cual esta expresada de la siguiente expresión (Çengel & Ghajar, 2020):

$$Q_{\text{combustible}} = \text{PCI} \cdot \text{peso}_{\text{comb,útil}} \quad \text{[J]} \quad (1.19)$$

Donde:

$m_{\text{consumo}}$ : consumo total de gas [kg]

PCI: Poder calorífico inferior del gas [J/kg]

### **Eficiencia térmica de un horno de fundición a gas**

En principios de la eficiencia térmica “real” se usa la razón entre, la energía contenida en las paredes del horno sumada a la energía recibida por el metal, con la energía total de entrada del gas (Turns,2012).

$$\eta_{\text{horno}} = \frac{Q_{\text{útil,fundición}}}{Q_{\text{combustible}}} \quad (1.20)$$

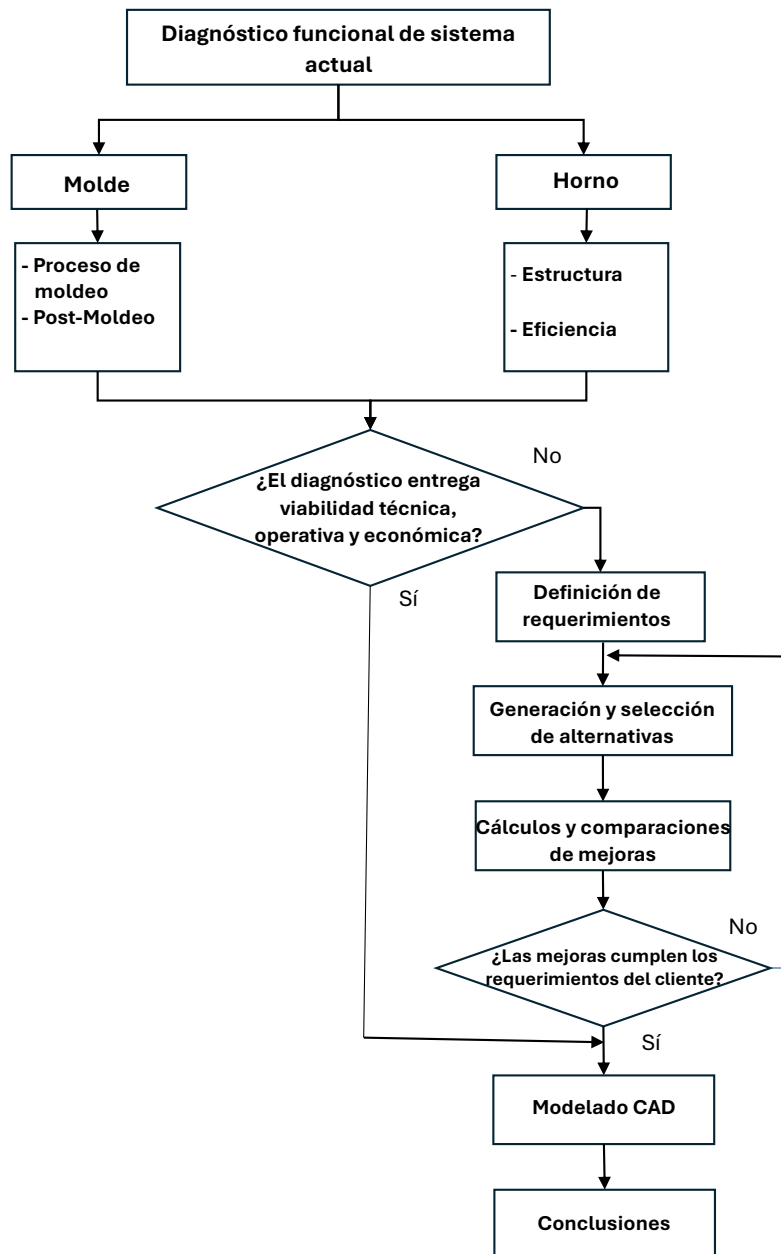
## **Capítulo 2**

## 2. Metodología

Para ilustrar de manera clara las etapas del proceso metodológico, se presenta el siguiente diagrama de flujo, el cual resume la secuencia de actividades realizadas durante las mejoras del molde y del horno.

Figura 2. 1

*Esquema metodológico*



## 2.1. Diagnóstico del proceso de elaboración en accesorios actuales

Unas de las problemáticas de la empresa, es el proceso con el que se lleva a cabo la fabricación para acoples de válvulas de paso (Figura 1.1).

A continuación, se presenta un análisis global del proceso de elaboración de los acoples:

**Tabla 2. 1**

*Ciclo de elaboración en un acople de 6", desde su preparación de chatarra, hasta el acabado final*

<b>Etapas</b>	<b>Entrada clave</b>	<b>Actividad</b>	<b>Salida</b>	<b>contrariedad</b>
<b>Compra de chatarra (aluminio)</b>	Variada (Lingotes, llenaderas, desechos de productos)	Selección y separación por aleaciones	Bodegas de chatarra	Variabilidad de aleaciones e impurezas
<b>Preparación de carga</b>	Bodegas, residuos sobrantes por mecanizado, piezas deterioradas	Clasificación de elementos con mayor y menor aleación	Carga administrada	
<b>Fundición</b>	Horno, carga, GLP	Fundir el aluminio a una temperatura de trabajo	Aluminio líquido	Temperaturas de hornos inestables
<b>Moldeo (piezas por separado)</b>	Tierra, moldes (brida, adaptador)	Llenado y solidificación	Bridas y adaptadores por separado	Elaboración de dos moldeos
<b>Desmoldeo y limpieza</b>	Cepillos de acero y equipos de cortes y perforación	Limpieza de tierra, corte de llenadera, limado y taladrado de bridas	Piezas limpias y limadas y mecanizadas	Sobremaquinado y residuos en exceso por dimensión estándar de acople
<b>Soldadura con MIG Al</b>	Bridas y adaptadores	Unión de brida con adaptador (Fijar, puntear y soldar)	Conjunto unido de manera coaxial	Tiempos y costos adicionales
<b>Acople terminado</b>	Pieza en conjunto		Pieza lista para comercializar	Estética de acabado, por sueldas no uniformes

*Nota.* Detalle de la contrariedad actual de la empresa

### 2.1.1. Alternativa actual (brida y adaptador por separado)

Figura 2. 2

*Molde de brida y adaptador para acople de 6" (sistema por separado)*



El proceso actual complementa dos ciclos de moldeo independientes: uno para la brida y otro para el adaptador. Aunque el adaptador permite obtener hasta cuatro unidades por ciclo, esta ventaja se ve compensada negativamente por el bajo rendimiento del moldeo de la brida, que produce una sola unidad por ciclo. En la etapa post-moldeo se mecanizan los diámetros internos del adaptador y la brida para garantizar su correcta unión. Este proceso requiere el corte de la sección del adaptador con equipo de corte para ampliar su diámetro, así como la aplicación de soldadura MIG con alta precisión para evitar posibles fugas, lo que demanda personal con conocimientos especializados.

### 2.1.2. Alternativa propuesta (brida y adaptador en conjunto)

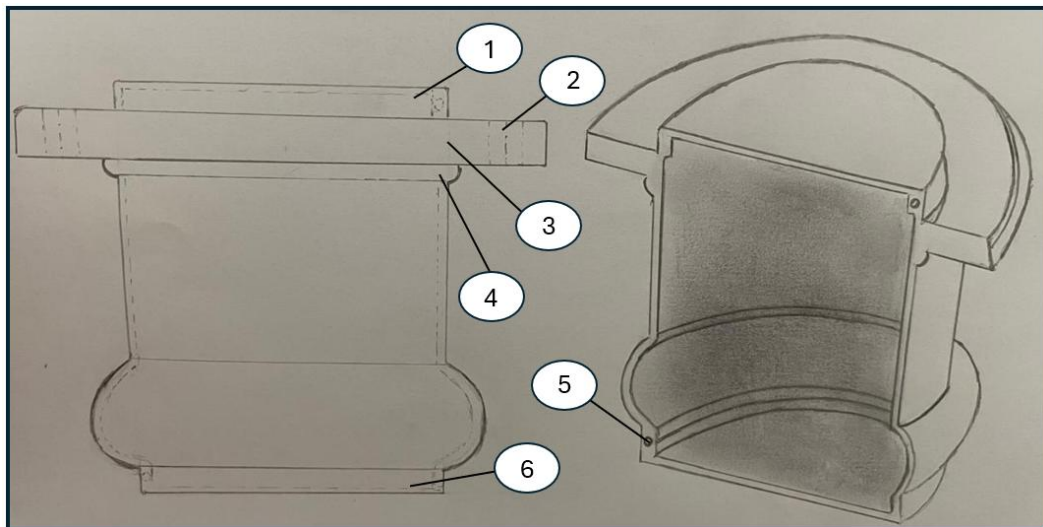
Tabla 2. 2

*Aspecto de mejoras del molde monolítico con sus características*

Aspecto de mejoras	Características
Número de piezas	1
Ciclos de moldeo	1
Unión	Integrada (sin uso de soldadura)
Precisión dimensional	Definida por molde
Generación de residuos	Reducida
Mecanizado	Básico

Figura 2. 3

*Bosquejo de molde monolítico con interfaz unida integrada*



1. Cavity extra superior para fijación de núcleo de tierra
2. Agujero para ajuste de perno
3. Brida redonda para empate
4. Interfaz fundida integrada

5. Agujero para fijación de cara superior
  6. Cavidad extra inferior para fijación de núcleo de tierra
- *Normas aplicadas:*

#### **ISO 14001:2015**

Esta norma establece los requisitos para implementar un sistema de gestión ambiental, aplicando un enfoque sistemático hacia la mejora continua y prevención de la contaminación (ISO,2015).

#### **ISO 9001:2015**

Esta norma define los requisitos para un sistema de gestión de calidad, enfocado en garantizar la mejoría de los procesos de elaboración (ISO, 2015).

## **2.2. Criterios de mejoras para los moldes**

En base a los requerimientos del cliente se pretende obtener un resultado rápido con menos **moldeo**, una pieza que brinde a la empresa una reducción de **mecanizado**, garantizando una **calidad de acabado** al no tener uniones que no se presenten de manera uniforme y por último minimizando el **costo** unitario al eliminar suelda con MIG Al para unir el adaptador a la brida. Cuantificamos la importancia de cada criterio de selección del diseño, mediante la siguiente tabla:

**Tabla 2. 3***Matriz de ponderación para criterios de diseño del molde*

Criterio	Moldeo	Mecanizado	Calidad de acabado	Costo unitario	Total	Ponderación
Moldeo		0.20	1	0.20	1.40	0.06
Mecanizado	5		5	1	11	0.44
calidad de acabado	1	0.2		0.20	1.40	0.06
Costo unitario	5	1	5		11	0.44
Total					24.80	1.00

Se agregarán valores de 1,3 y 5 para poder decir cuál será la mejor solución entre ambos procesos. Dando una asignación de 1 para un requerimiento regular, 3 para bueno y 5 para muy bueno.

**Tabla 2. 4***Matriz de selección de diseño del molde*

Alternativa	Moldeo	Mecanizado	calidad de acabado	costo unitario	Total
<b>Ponderación</b>	0.06	0.44	0.06	0.44	1
Brida y adaptador por separado	3	1	3	1	1.24
Brida y adaptador en conjunto	3	3	5	5	2.73

La Figura 2.4 muestra la toma de datos, considerando que no alterará mediciones importantes como el diámetro interno del adaptador, que es donde conectan tuberías de dimensiones estándares de PVC.

**Figura 2. 4**

*Registro de mediciones de moldes actuales*



### **2.2.1.1. Determinación de mazarota para nuevo diseño integrado**

Una vez planteado las dimensiones del molde integrado, es necesario determinar que la pieza final no tenga falla por porosidad o rechupe, por lo que procedemos a realizar un análisis de mazarota.

Para dimensionamiento y posicionamiento de la mazarota en el molde integrado, usamos la ley de Chvoriov.

El módulo térmico se lo obtiene de la ecuación (1.2):

$$M = \frac{V}{A} \text{ [m]}$$

La condición de diseño requiere:

$$M_{\text{masarota}} \geq 1.2M_{\text{zona}}$$

### 2.3. Diagnóstico del funcionamiento, estructural y térmico del horno actual

El horno actual presenta un gran deterioro, concluyendo a simple vista un bajo rendimiento. La figura 2.5 muestra que no cuenta con una estructura adecuada, careciendo de tapa, una entrada correcta para el flujo de la llama; además que los aislamientos que componen sus paredes ya están con un desgaste por su uso de más de 18 años.

**Figura 2. 5**

*Horno cilíndrico a gas GLP actual de la empresa*



## Detalles de estructura actual

A continuación, se detalla una lista de chequeo para evaluar las condiciones actuales del horno:

**Tabla 2. 5**

*“Checklist” para evaluación del horno actual*

Nº	Componentes	Observación	Criterio de evaluación	Cumple (Sí/No)
1	Estructura metálica	Oxidada y con deformaciones por temperatura y tiempo de uso	verificación de condición mecánica y estable	No
2	Asilamiento refractario interno	Fragmentado, con pérdida de material y fisuras	Revestimiento continuo, sin grietas ni desprendimiento	No
3	crisol	Estable, con un pequeño desgaste por corrosión	Sin grietas, interior limpio, ni deformaciones	Sí
4	Boca superior sin tapa	Abertura libre y sin control de calor	Debe poseer tapa o chimenea para reducir pérdidas	No
5	Pérdidas térmicas visibles	Fuga de calor por abertura y paredes	Pérdidas mínimas, temperatura controlada	No
6	Control de temperatura de la colada	Ausencia de sensores de temperatura, control visual de un operador hacia el color del aluminio	Debe monitorearse la temperatura del aluminio (650-750°C)	No
7	Entrada de llama	Flujo de llama ajustada basándose en la observación visual del operador	Control de llama estable	Sí
8	Ubicación de la entrada de llama	La llama entra de frente hacia el crisol, generando que el calor no se distribuya de manera uniforme en la cámara del horno	Entrada de manera tangencial al crisol para mejor distribución de calor	No
9	Base o soporte	Inestable y sin nivel	Estructura firme y nivelada	No

## Registros de datos del horno y crisol

**Figura 2. 6**

*Toma de mediciones del horno y el crisol (Apéndices B)*



Las condiciones reales de operación del horno se establecen a partir de la información proporcionada por la empresa y de mediciones realizadas durante el proceso de fundición.

En cada jornada de operación se procesará un máximo aproximado de 220 lb de aluminio reciclado, con un consumo de un poco más de dos cilindros de gas GLP domésticos por día.

Para saber un aproximado del porcentaje de escoria, tomamos la elaboración de un acople de 6 pulgadas (brida y adaptador) después del desmoldeo, es decir, con llenadera y rebabas. Estas tienen un peso de 13.5lb y en base a un dato interno del operador de la empresa, se estima

aproximadamente 15lb de aluminio(chatarra) para el llenado de ambas piezas. las especificaciones geométricas, de operación y la carga se la encuentran en Apéndice B.

### 2.3.1. Determinación de calor para elevar la temperatura

De la ecuación (1.14).

$$q_s = m_{Al} \cdot c_{p,s}(T_f - T_0) \text{ [J]}$$

Donde:

$m_{Al}$ : masa de crisol [kg]

$c_{p,s}$ : calor específico del aluminio en estado sólido [J/kg·K]

$T_f$ : temperatura de fusión del metal [°C]

$T_0$ : temperatura ambiente [°C]

### 2.3.2. Determinación de calor para fusión

De la ecuación (1.15):

$$q_L = m_{Al} \cdot L_f \text{ [J]}$$

### 2.3.3. Determinación de calor para vertido

Una vez que el aluminio llega a su cambio de fase se calcula el calor requerido para llegar a la temperatura de vertido. De la ecuación (2.14):

$$q_{liq} = m_{Al} \cdot c_{p,liq}(T_v - T_f) \text{ [J]}$$

$m_{Al}$ : masa del aluminio [kg]

$c_{p,s}$ : calor específico del aluminio en estado líquido [J/kg·K]

$T_v$ : temperatura de vertido [°C]

$T_f$ : temperatura fundición [°C]

### 2.3.4. Determinación de la energía total de fusión para la carga

De la ecuación (1.16):

$$q_{\text{útil,fusión}} = q_s + q_L + q_v \quad [J]$$

### 2.3.5. Determinación del calor sobre el crisol

De la ecuación (1.14):

$$q_{\text{crisol}} = m_{\text{crisol}} \cdot c_{p,A36}(T_f - T_0) \quad [J]$$

Donde:

$m_{\text{crisol}}$ : masa de crisol [kg]

$c_{p,A36}$ : calor específico del crisol [J/kg·K]

$T_f$ : temperatura de fusión del metal [°C]

$T_0$ : temperatura ambiente [°C]

### 2.3.6. Determinación de la energía total de la fundición

De la ecuación (1.17):

$$q_{\text{útil,fundición}} = q_{\text{útil,fusión}} + q_{\text{crisol}} \quad [J]$$

### 2.3.7. Determinación de peso total y calor requerido por unidad de masa para el aluminio y el crisol en conjunto

- *Peso total (aluminio y crisol)*

$$\text{masa}_{\text{total}} = m_{\text{Al}} + m_{\text{crisol}} \quad [\text{kg}] \quad (2.1)$$

Con ello, determinamos el calor requerido que permitirá analizar el consumo de combustible:

$$q_{kg} = \frac{q_{\text{útil, fundición}}}{\text{Peso}_{\text{total}}} \text{ [J/kg]} \quad (2.2)$$

### 2.3.8. Determinación de la capacidad de calentamiento

- *Área total interna (cámara)*

Área de la base:

Debemos considerar el espesor del ladrillo

$$A_{\text{base}} = \pi r^2 \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.3)$$

Donde:

r: radio de la base del horno [m]

Área del cuerpo interno

$$A_{\text{cuerpo, int}} = 2\pi r \cdot H \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.4)$$

Donde:

H: altura del horno [m]

Área del crisol:

$$A_{\text{crisol}} = \pi r_{\text{cri}}^2 \cdot h \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.5)$$

Donde:

$r_{\text{cri}}$ : radio exterior del crisol [m]

h: altura del crisol [m]

- Área total de la cámara de combustión:

$$A_{\text{cámara}} = A_{\text{base}} + A_{\text{cuerpo}} - A_{\text{crisol}} \text{ [m}^2\text{]} \quad (2.6)$$

Luego calculamos la capacidad de calentamiento con la finalidad de adquirir de cuan capaz es el horno para altas temperaturas.

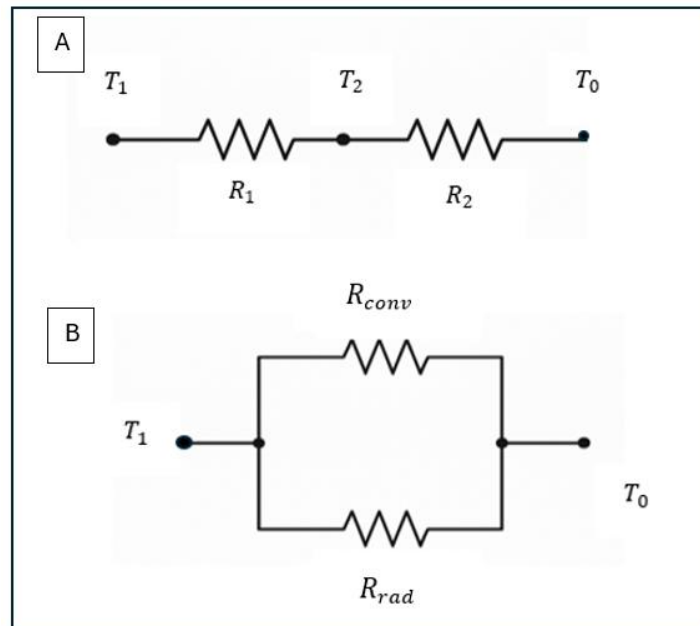
$$\text{Cap}_{\text{calentamiento}} = \frac{\text{Peso}_{\text{total}}}{A_{\text{cámara}}} \text{ [kg/m}^2\text{]} \quad (2.7)$$

### 2.3.9. Análisis de calor, usando la analogía de resistencias eléctricas

Para el análisis de distribución y el comportamiento de calor en el horno, consideramos el flujo de calor a través de las capas y el ambiente usando la analogía del flujo de corriente eléctrica usando resistencias en serie y resistencia en paralelo (Çengel & Ghajar, 2019).

Figura 2. 7

Circuito de resistencias térmicas



Nota. **A.** circuito en serie para transferencias de calor por conducción en capas. **B.** circuito en paralelo para transferencia por convección y radiación de manera simultánea e independiente.

### 2.3.10. Análisis de transferencia de calor por conducción

- *Conducción de calor para la base del horno*

De la ecuación (1.3):

$$Q_{\text{cond,base}} = \frac{k_{\text{ladr}} A_{\text{base}} (T_1 - T_2)}{e_{\text{base}}} \text{ [W]}$$

Donde:

$k_{\text{ladr}}$ : conductividad térmica del ladrillo [w/mK]

$e_{\text{base}}$ : espesor del ladrillo [m]

$T_1$ : temperatura de la cámara [°C]

$T_2$ : temperatura externa [°C]

- *Conducción de calor hacia dentro del suelo*

De la ecuación (1.3):

$$Q_{\text{cond,suelo}} = \frac{k_{\text{suelo}} A_{\text{base}} (T_{\text{base}} - T_0)}{e_{\text{prof}}} \text{ [W]}$$

Donde:

$k_{\text{suelo}}$ : conductividad térmica del suelo [w/mK]

$e_{\text{prof}}$ : profundidad de suelo [m]

$T_{\text{base}}$ : temperatura de la base [°C]

$T_0$ : temperatura ambiente [°C]

- *Conducción de calor para el cuerpo del horno*

El comportamiento del cuerpo es distinto al de la base, debido a que se trata de una transferencia de forma radial. En base a eso realizamos cálculo mediante la ecuación (1.6),

(1.7):

$$Q_{\text{cond,cuerpo}} = 2\pi L \cdot \left[ \frac{T_1 - T_3}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_{\text{ladrillo}}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_{\text{metal}}}} \right] \text{ [W]} \quad (2.8)$$

Donde:

$T_1$ : temperatura de cámara [°C]

$T_3$ : temperatura de lámina de metal [°C]

$k_{\text{ladrillo}}$ : conductividad térmica del ladrillo [W/mK]

$k_{\text{metal}}$ : conductividad térmica del metal [W/mK]

$L$ : longitud del horno [m]

$r_1$ : distancia al ladrillo [m]

$r_2$ : distancia a la lámina de metal [m]

$r_3$ : radio del horno [m]

### 2.3.11. Análisis de transferencia de calor por convección

- *Convección de calor para el cuerpo del horno*

Necesitamos obtener el valor del coeficiente de expansión térmica del fluido, expresada:

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{película,c}}} \text{ [1/K]} \quad (2.9)$$

Donde:

$T_{\text{película}}$  : la temperatura de película

Esta temperatura representa el valor medio del gradiente térmico a través de la capa límite térmica y es definida como el promedio entre la temperatura de la superficie y la del fluido libre (Cengel & Ghajar, 2019).

$$T_{\text{película,c}} = \frac{T_{\text{ambiente,c}} + T_3}{2} \text{ [K]} \quad (2.10)$$

Calculamos el número de Rayleigh con la ecuación (2.9).

$$Ra_{\text{cuerp}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

Con el valor de  $Ra_{\text{cuerpo}}$  y de  $Pr_{\text{cuerpo}}$ , determinamos el número de Nusselt con la ecuación (1.10), para lado vertical.

$$Nu_{\text{cuerp}} = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_{\text{cuerp}}^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{Pr_{\text{cuerp}}} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2 ; Ra \geq 10^9; \text{turbulento}$$

Obtenido el valor de  $Nu$ , calculamos el coeficiente de convección a partir de la ecuación (1.12)

$$h_{\text{cuerp}} = \frac{Nu_{\text{cuerp}} \cdot k}{L_{\text{cuerp}}} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

- *Convección de calor en la parte superior del horno*

La abertura sin tapa se la simula como una placa horizontal. De la ecuación (1.11).

$$Nu_{sup} = 0.54Ra^{1/4}; 10^4 \leq Ra_{sup} \leq 10^7; \text{laminar}$$

De la ecuación (1.12):

$$h_{sup} = \frac{Nu_{sup} \cdot k}{L_{sup}} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

### 2.3.12. Análisis de transferencia de calor por radiación

- *Radiación de calor en la parte superior del horno*

Resistencias dadas de manera paralela. En este caso, la radiación se expresa de la misma forma que la convección (Çengel & Ghajar, 2019, p.29):

$$Q_{rad,sup} = h_{rad,sup} A_{sup} (T_{sup} - T_{\infty}) \text{ [W]} \quad (2.11)$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación se la determina por la ecuación (1.13).

$$h_{rad,sup} = \varepsilon \sigma (T_{sup} - T_{\infty}) (T_{sup}^2 + T_{\infty}^2) \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (2.12)$$

- *Radiación de calor en la parte lateral del horno*

$$Q_{rad,cuerpo} = h_{rad,cuerpo} A_{cuerpo} (T_3 - T_{\infty}) \text{ [W]} \quad (2.13)$$

$$h_{rad,cuep} = \varepsilon \sigma (T_3 - T_{\infty}) (T_3^2 + T_{\infty}^2) \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]} \quad (2.14)$$

### 2.3.13. Pérdida total de calor en el horno

- *Pérdida total de calor en el cuerpo del horno:*

La pérdida de calor total en el cuerpo es la suma entre el calor por convección y radiación al exterior y por la conducción en las capas:

$$Q_{\text{cuerpo}} = Q_{\text{cond,cuerpo}} + Q_{\text{conv,cuerpo}} + Q_{\text{rad,cuerpo}} \text{ [W]}$$

O también:

$$Q_{\text{cuerpo}} = Q_{\text{cond,cuerpo}} + (h_c + h_{\text{rad,cuerp}})A_{\text{cuerp}}(T_3 - T_{\infty}) \text{ [W]} \quad (2.15)$$

- *Pérdida total de calor en la parte inferior del horno:*

Calculamos la pérdida de calor de la base sumando el calor de conducción en la capa de ladrillo y del suelo:

$$Q_{\text{inferior}} = Q_{\text{cond,base}} + Q_{\text{cond,suelo}} \text{ [W]} \quad (2.16)$$

- *Pérdida total de calor en la parte superior del horno:*

Calculamos la pérdida de calor en la superficie, haciendo la suma de conducción y radiación expuestas de manera simultánea al ambiente:

$$Q_{\text{superior}} = Q_{\text{rad,sup}} + Q_{\text{conv,sup}} \text{ [W]}$$

O también de la ecuación (2.15):

$$Q_{\text{superior}} = (h_s + h_{\text{rad,sup}})A_{\text{sup}}(T_{\text{sup}} - T_{\infty}) \text{ [W]}$$

- *Pérdida de calor por gas:*

Para un horno sin tapa, se considera un exceso de aire de aproximadamente 30%, dando un equivalente de  $\lambda = 1.3$ , dentro del rango comúnmente reportado para equipo térmicos (Purdue University, 2024).

Este combustible es una mezcla de 60% butano y 40% propano (Empresa Pública Petroecuador, 2024).

La relación estequiométrica de aire combustible (RAC) tiene un valor alrededor de 15.6 de aire por cada kg de combustible (Heywood, J.B, 1988) De las ecuaciones (1.14), (2.17), (2.18):

De la ecuación (2.14):

$$Q_{\text{gases}} = m_{\text{gases}} \cdot c_{p,\text{gases}}(T_v - T_0) \quad [J]$$

Donde:

$$m_{\text{gases}} = m_{\text{aire}} + m_{\text{glp}} \quad (2.17)$$

$$m_{\text{aire}} = \lambda RAC \cdot m_{\text{glp}} \quad (2.18)$$

Para el cálculo total del calor en el horno, sumaremos las pérdidas de calor generado por las paredes y la parte superior del horno:

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{cuerpo}} + Q_{\text{inferior}} + Q_{\text{superior}} + Q_{\text{gases}} \quad [W] \quad (2.19)$$

#### 2.3.14. Determinación del calor total por medio de balance energético

Energía aprovechada para el proceso de fusión y las pérdidas térmicas que ocurren en sus paredes y base, mediante la ley de conservación de energía.

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{horno}} + Q_{\text{útil,fundición}} \quad [W] \quad (2.20)$$

### 2.3.15. Determinación del consumo de combustible

Se considera el poder calorífico inferior de 45605.6kJ/kg debido a que, en el horno actual, los gases de combustión salen sin condensación significativa del valor de agua. Tiene muchas fugas, ineficiencias del aislamiento, etc. Este combustible es una mezcla de 60% butano y 40% propano (Empresa Pública Petroecuador, 2024). De la ecuación (1.19):

$$Q_{\text{combustible}} = \text{PCI} \cdot \text{peso}_{\text{comb,útil}}$$

### 2.3.16. Determinación de la eficiencia del horno

La eficiencia “real” del horno para una tanda de 33.33kg de carga en un lapso de 106 minutos se obtiene de la ecuación (1.20):

$$\eta_{\text{horno}} = \frac{Q_{\text{útil,fundición}}}{Q_{\text{combustible}}}$$

## 2.4. Requerimientos y alternativas de mejoras para el horno

En base a los resultados del diagnóstico y el análisis de pérdidas, se requiere:

- Mejoramiento de aislamiento térmico
- Incorporación de tapa
- Incorporación de control de temperatura para colada

Las normas por considerar para las mejoras del horno son las siguientes:

### **ASTM C17: Standars Terminology for Refractories**

Define tipos, clasificación y propiedades de ladrillos refractarios. Selección de ladrillo denso, aislante, alúmina de 40% a 60%, etc (ASTM International, 2020).

## ISO 14001: Gestión Ambiental

Control de emisiones del GLP, minimización de escorias (ISO, 2015).

### 2.4.1. Consideración de dimensiones y selección de crisol

Las dimensiones del crisol se ajustan para la producción diaria de la empresa, pero se plantea una interrogante:

¿se recomienda seguir usando acero A36 para su material o es mejor cambiarse a un crisol de grafito?

Los criterios de selección se basarán en la **calidad metalúrgica**, importante para evitar daños por reacciones químicas, **vida útil** del crisol para evitar cambios a corto tiempo, que tenga buena **resistencia a golpes** debido al proceso de llenado de la empresa, con buena **resistencia al choque térmico** para evitar deformaciones a altas temperaturas, con una **disponibilidad local** por cualquier reemplazo repentino y a buen **costo** para alcance de la empresa.

- Alternativa 1: Crisol de acero al carbono A36 (uso actual)

Esta alternativa tiene mucha disponibilidad local, estableciendo un costo relativamente bajo para adquirirlo, con buena conductividad térmica y resistente a golpes. El material en contacto con el aluminio fundido puede generar capas intermetálicas adelgazando la pared del crisol, pero se puede construir y/o restaurar las partes afectadas por el desgaste (recurso de soldadura disponible en la empresa).

- Alternativa 2: Crisol de grafito ideal para fundición de metales no ferrosos

Es una alternativa que mantiene una alta estabilidad química frente al aluminio fundido con buena conductividad térmica y resistente a choques térmicos. En cuanto a adquisición en el mercado, existe la necesidad de importación cuando se trata de capacidades mayores a 30kg, por lo que su costo es elevado. No es resistente a golpes, por lo que se necesita mucho cuidado cuando se realiza el proceso de cargado o de llenado, ya que no se pueden reparar, una vez rotos, tendrán que reemplazarse.

**Tabla 2. 6**

*Matriz de ponderación para selección de crisol*

Criterio	Calidad metalúrgica	Vida útil	Resistencia a golpes	Choque térmico	Disponibilidad	Costo	Total	Ponderación
Calidad metalúrgica		5	5	5	3	3	21	0.28
Vida útil	0.20		5	5	3	3	16.2	0.22
Resistencia a golpes	0.20	0.20		3	1	3	7.40	0.10
Choque térmico	0.20	0.20	0.33		3	3	6.73	0.09
Disponibilidad	0.33	0.33	1	0.33		3	4.99	0.07
Costo	0.33	0.33	0.33	0.33	0.33		1.65	0.02
<b>TOTAL</b>							<b>57.97</b>	<b>1.00</b>

**Tabla 2. 7**

*Matriz de selección del crisol*

Alternativa	Calidad metalúrgica	Vida útil	Resistencia a golpes	Choque térmico	Disponibilidad	Costo	TOTAL
<b>Ponderación</b>	0.28	0.22	0.10	0.09	0.07	0.02	1.00
<b>Crisol de acero al carbono A36 (uso actual)</b>	3	3	5	3	5	5	<b>3.34</b>
<b>Crisol común de grafito</b>	5	5	1	5	3	1	<b>3.74</b>

#### 2.4.2. Materiales aislantes para cuerpo, base y tapa del horno

Las mejoras del horno se basarán en un sistema de revestimiento térmico multicapa, las cuales deben combinar al menos una capa densa de trabajo, una capa aislante de respaldo y cubierta por una carcasa metálica. Este tipo de modelos de hornos es común para pequeñas empresas que se dedican a la fundición de aluminio de manera artesanal (Morgan Thermal Ceramics, 2015).

**Tabla 2. 8**

*Características de materiales de al menos tres capas*

Capa	Material genérico / tipo
1. Revestimiento interno (cara de trabajo)	Concreto refractario denso de alta alúmina, o ladrillo/baldosa refractaria alta alúmina
2. Aislante de respaldo (aislamiento térmico principal)	Manta o placa de fibra cerámica, densidad, aproximadamente 128 kg/m <sup>3</sup> , con temperatura máxima de servicio ~1260 °C
3. Envoltente exterior (lámina metálica)	Plancha de acero al carbono, tipo estructural (ASTM A36)

*Nota.* Las propiedades y los costos se los describen en Apéndices D

Una vez seleccionado el crisol y haber obtenido los materiales, se calcula la eficiencia del horno mejorado en base al criterio de una temperatura efectiva en la lámina entre 40°C-50°C, siendo este un rango tolerante a la piel (NASA, 1995).

#### 2.4.3. Selección de alternativas para tapa del horno

Los criterios de selección se basarán en la **seguridad y ergonomía**, para adaptar mejor el puesto del operario. La **facilidad de operación**, ya que, si bien aún no se conoce el tamaño de la tapa, podemos considerar que su diámetro será mayor al actual (57cm), por lo que la idea

es reducir esfuerzo para abrir y cerrar la tapa, la **facilidad constructiva** y el **costo de fabricación** para requerimientos del cliente.

- Alternativa 1: Tapa abatible con bisagra trasera

Para este modelo se requiere trabajar muy cerca del frente caliente del horno para realizar su apertura. Al considerar la medida que supera los 60cm, se puede tener un esfuerzo alto para levantarla debido a su peso. Su modelo siempre facilita un costo bastante accesible para fabricarla.

- Alternativa 2: Tapa abatible lateral

En este modelo el operario estará menos expuesto al calor del horno, con su giro suave hará un manejo cómodo e incluso con una tapa de estas medidas. La fabricación requiere de más material, pero sigue teniendo una elaboración sencilla.

- Alternativa 3: Tapa abatible con brazo y contrapeso

Este modelo hace que la tapa sea muy ligera de operar, pero existe el riesgo que sea peligroso si falla el mecanismo, su facilidad de operación es buena, aunque su diseño sea complejo y requiere más costos por materiales.

**Tabla 2. 9***Matriz de ponderación para selección de tapa*

Criterio	Seguridad y ergonomía	Facilidad de operación	Costo de fabricación	Facilidad constructiva	Total	Ponderación
Seguridad y ergonomía		3	5	5	18.0	<b>0.40</b>
Facilidad de operación	0.3		3	5	13.3	<b>0.29</b>
Costo de fabricación	0.2	0.3		3	8.5	<b>0.19</b>
Facilidad constructiva	0.2	0.2	0.3		5.7	<b>0.12</b>
<b>TOTAL</b>					<b>45.5</b>	<b>1.00</b>

**Tabla 2. 10***Matriz de selección para tapa*

Alternativa	Seguridad y ergonomía	Facilidad de operación	Costo fabricación	Facilidad constructiva	TOTAL
<b>Ponderación</b>	0.40	0.29	0.19	0.12	1.00
<b>Tapa abatible con bisagra trasera</b>	3	2	5	5	<b>3.33</b>
<b>Tapa abatible lateral</b>	5	5	4	4	<b>4.69</b>
<b>Tapa abatible con brazo y contrapeso</b>	4	4	2	2	<b>3.38</b>

#### 2.4.4. Control térmico para la colada

Para evitar el sobrecalentamiento del aluminio, se considerará una termocupla tipo K, debido a su suficiente precisión, respuesta, versatilidad, disponibilidad y costo-beneficio (Temsens Instruments, 2024). Se instalará por medio de un conducto paralelo que pasará por el ladrillo a lo largo del radio de la tapa, fijando el extremo sensible cerca de la boca del crisol, midiendo la atmosfera muy cercana al metal fundido. La señal se envía a un control PID

configurado sólo como monitor y alarma. Cuando la temperatura supera el límite establecido, el sistema activará una alarma visual o sonora, permitiendo detener manualmente el calentamiento por GLP.

Ya que esta configuración no toma la lectura del metal directamente, se plantea un sesgo sistemático:

$$T_{\text{metal}} = T_k + \Delta \quad (2.21)$$

Donde:

$T_{\text{metal}}$ : Temperatura del metal [°C]

$T_k$ : Temperatura de la termocupla [°C]

$\Delta$ : Desfase térmico asociado a la disposición del sensor [°C]

## Capítulo 3

### 3. Resultados y análisis

#### 3.1. Análisis del proceso de moldeo independiente (Brida/Adaptador)

En este apartado se consideró geometría, orientación y comportamiento térmico durante la solidificación (Tabla 3.1).

**Tabla 3. 1**

*Detalles de moldeo entre brida y adaptador*

Criterio	Brida	Adaptador
Tipo de moldeo	Moldeo en arena	Moldeo en arena
Orientación en el molde	Horizontal	Vertical
Complejidad geométrica	Baja	Media
Requerimiento de núcleo de arena	No requiere	Indispensable para formar la cavidad interna
Tiempo de llenado	Corto	Corto
Tiempo de solidificación	Más lento debido a su grosor	Rápido y uniforme
Gradiente térmico	Medio	Moderado
Comportamiento a contracción	Geometría gruesa y maciza - mayor riesgo de rechupe	Paredes delgadas - menor riesgo de rechupe
Productividad por molde	1 pieza por cavidad	Hasta 3 piezas por moldeo
Ventaja principal	Proceso simple y estable	Mayor rendimiento por colada

Durante el proceso se apreció que lo tardío en el moldeo independiente, es hacer la brida una por una, lo que contrarresta el método de 3 adaptadores por moldeo. También se considera que se necesitan núcleos de tierra para formar la cavidad interna del adaptador (Figura 3.1).

**Figura 3. 1**

*Moldeo en tierra de adaptador y brida de 6"*



**3.2. Análisis del proceso productivo posterior del desmoldeo**

Este análisis se limita a las operaciones posteriores al desmoldeo, dado que el objetivo de la mejora es reducir operaciones correctivas y sin valor agregado en esta etapa de proceso como se observa en la Figura 3.2.

**Figura 3. 2**

*Elaboración de acople de 6" posterior al desmoldeo*



**Tabla 3. 2**

*Análisis de valor del proceso actual*

Operación	¿Agrega valor al producto?	Justificación técnica
Limpieza individual	✘ No	No modifica función, solo acondiciona
Corte de sección	✘ No	Corrección necesaria por diseño de acople estandarizado
Alineación manual	✘ No	Compensa falta de integración
Soldadura	✘ No	Unión artificial, no parte del diseño ideal
Limpieza del cordón	✘ No	Consecuencia directa de soldar
<b>Total, valor agregado</b>	<b>Muy bajo</b>	Corrección necesaria

El bajo nivel de valor agregado identificado en el proceso actual (Tabla 3.2), no es consecuencia de ineficiencias operativas aisladas, sino del enfoque de diseño y fabricación en las piezas por separado, que obliga a introducir múltiples operaciones correctivas.

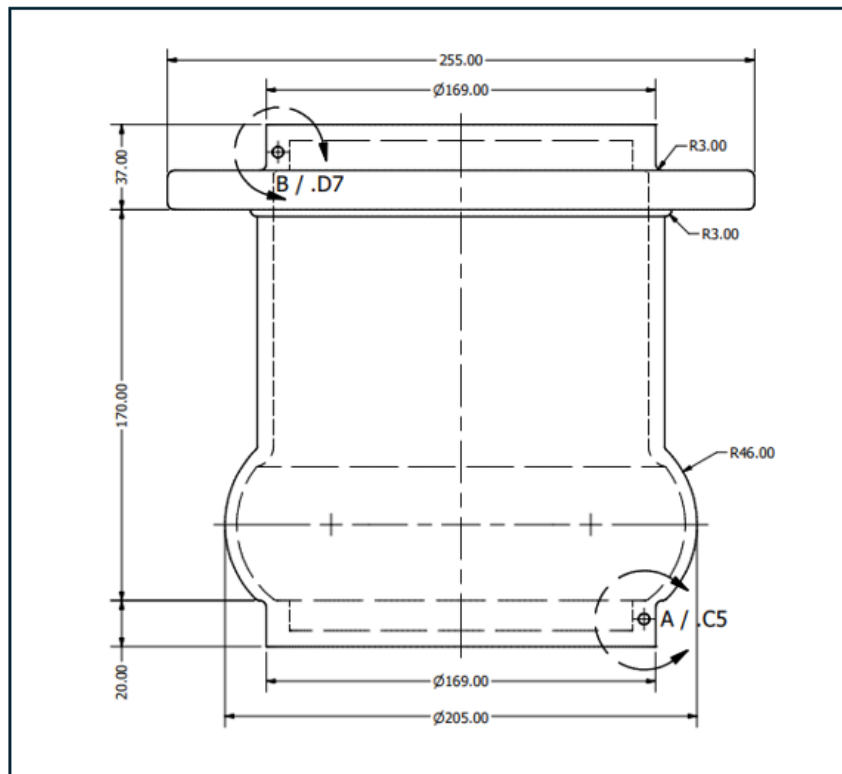
### **3.3. Análisis de requerimientos técnicos y térmicos para el moldeo**

La Figura 3.3 muestra los requerimientos técnicos de la propuesta del molde monolítico confirmando lo siguiente:

- Brida y adaptador alineada coaxialmente.
- Eliminación de sección reducida del adaptador.
- Dimensión interna estándar para tubería PVC.
- El radio en las uniones se consideró de 3 mm, ya que el exceso de material en esa zona generaría punto caliente.

**Figura 3. 3**

*Molde monolítico basado en los requerimientos técnicos*



### 3.3.1. Requerimientos de mazarota para punto caliente del molde monolítico

Los resultados a continuación muestran las dimensiones y la ubicación de la mazarota en su zona más crítica.

**Tabla 3. 3**

*Resultados geométricos y térmicos por zona del acople monolítico*

Zona / elemento	Modelo geométrico	Volumen V (cm <sup>3</sup> )	Área de enfriamiento A (cm <sup>2</sup> )	Módulo térmico M = V/A (cm)	Interpretación ingenieril
<b>Brida</b>	Disco anular macizo	513.5	827.4	0.62	Mayor módulo → solidifica más lento. Zona crítica para rechupes
<b>Adaptador</b>	Cilindro hueco	635.5	1853.5	0.34	Solidifica más rápido que la brida
<b>Unión adaptadora-brida</b>	Anillo cilíndrico	116.0	406.0	0.29	No gobierna la solidificación; menor que brida

**Tabla 3. 4**

*Resultados integrados del diseño de la mazarota para el modelo monolítico*

Aspecto de diseño	Parámetro evaluado	Criterio técnico aplicado	Valor obtenido	Resultado ingenieril
Zona crítica para alimentar	Módulo térmico de la brida	Zona con mayor M gobierna la solidificación	<b>0.62 cm</b>	Brida definida como zona crítica
	Módulo mínimo requerido	$M_{maz} \geq 1.2M_{zona crítica}$	<b>0.744 cm</b>	—
Criterios volumétricos	Volumen de la brida	—	<b>513.5 cm<sup>3</sup></b>	—
	Volumen requerido a alimentar	6.6% de contracción en Aleaciones de aluminio	<b>34 cm<sup>3</sup></b>	—
	Eficiencia de la mazarota ( $\eta$ )	Mazarota visible en arena	<b>0.30</b>	—
	Volumen mínimo requerido	$V_{requerido} \geq \frac{V_{contracción}}{\eta}$	<b>113 cm<sup>3</sup></b>	—
	Volumen obtenido	$\geq 113 \text{ cm}^3$	<b>141.37 cm<sup>3</sup></b>	<input checked="" type="checkbox"/> Volumen suficiente
Dimensiones de la mazarota	Diámetro del cuerpo (D)	$H \approx 1.2D$	<b>6.0 cm</b>	Medidas suficientes para una adecuada alimentación
	Altura del cuerpo (H)		<b>5.0cm</b>	
Condición de solidificación	Módulo obtenido de la mazarota	$\geq 0.744 \text{ cm}$	<b>1.15 cm</b>	<input checked="" type="checkbox"/> Solidifica después que la brida
Cuello de la mazarota	Diámetro del cuello (d)	40-70 % de D (se adopta 60 %)	<b>3.6 cm</b>	Alimentación adecuada
	Altura del cuello (h)	Compromiso flujo-corte rápido	<b>3.0 cm</b>	Evita congelamiento
	Volumen del cuello	—	<b>30.53 cm<sup>3</sup></b>	Paso suficiente de metal
Manufacturabilidad	Tipo de mazarota	Recomendado en arena	Cilíndrica visible	—
	Separación posterior	Cuello dimensionado	Fácil remoción	Corte controlado

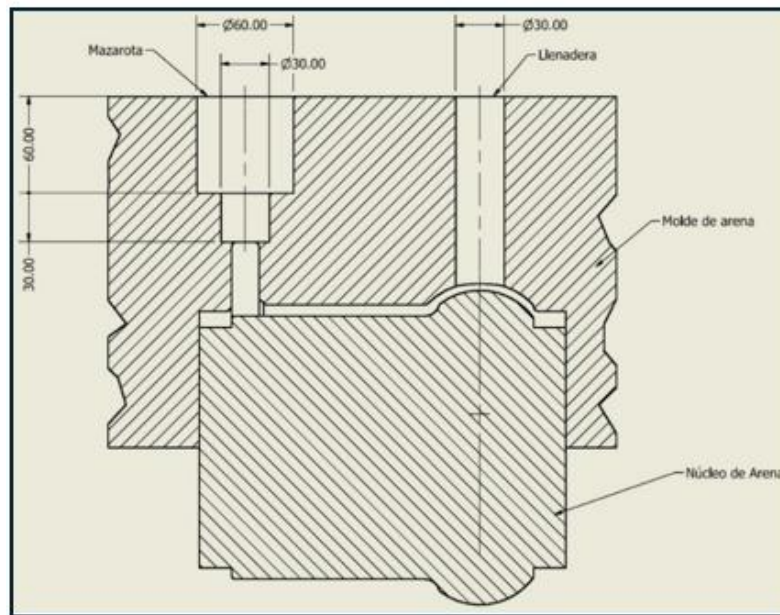
La Tabla 3.4 de resultados demuestran que la mazarota diseñada cumple simultáneamente los criterios térmicos, volumétricos y geométricos exigidos para el moldeo de arena, garantizando una solidificación posterior a la zona crítica.

### 3.3.2. Ubicación de la mazarota para el proceso de moldeo

La ilustración en la Figura 3.4 muestra la disposición de la mazarota tipo “abierta” en el molde de acople monolítico. La ubicación se ubica sobre la brida (zona crítica) para facilidad de corte, mientras que en el extremo del adaptador su respectiva llenadera para el vertido.

**Figura 3. 4**

*Sistema de alimentación del acople monolítico*



### 3.4. Resultados de costos como criterio para determinar ventajas productivas

Para los términos económicos, se tomó en consideración todos los puntos clave de operación, sobre todo en el proceso por separado. La empresa estima un costo de soldadura de USD 10 para una cantidad perimetral de 6” (aprox.16cm), por cada dos adaptadores se consume un disco de corte de USD 1 para la sección a extraer. Así mismo, el costo por mano de obra en un

proceso por separado necesita de la capacidad de un operario especializado para el manejo de máquinas de corte, soldadura tipo MIG y taladro; dicho operario presenta un costo semanal de USD 200 por 48 horas y USD 100 para un operario básico limitado a uso de taladro y cierras de corte.

La empresa dedujo que el tiempo máximo que se tarda un operario capacitado para remover sección, perforar la brida y soldar las piezas es de 17 minutos.

**Tabla 3. 5**

*Análisis técnico-económico del proceso por separado y monolítico*

Indicador / Criterio	Convencional (piezas separadas)	Monolítico (una pieza colada)	Variación	Mejora
Tiempo total (min/pieza)	17	10	7	Reducción del 41.2% del proceso
Soldadura MIG	10.00	0.00	10	Eliminación del proceso de suelda
Disco de corte	0.50	0.00	0.50	No es necesario usar máquinas de corte
MO por pieza (USD/pieza)	1.1806	0.3472	0.833	Más ajustable a un operario básico
Total, post-moldeo (USD/pieza)	11.6806	0.3472	11.333	Margen significativo de ahorro por pieza
Capacidad productiva (pieza/h)	3.53	6.00	70%	Amplio aumento de producción en menos tiempo
% del precio de venta (40 USD)	29.20%	0.87%	28.33%	Mayor impacto comercial

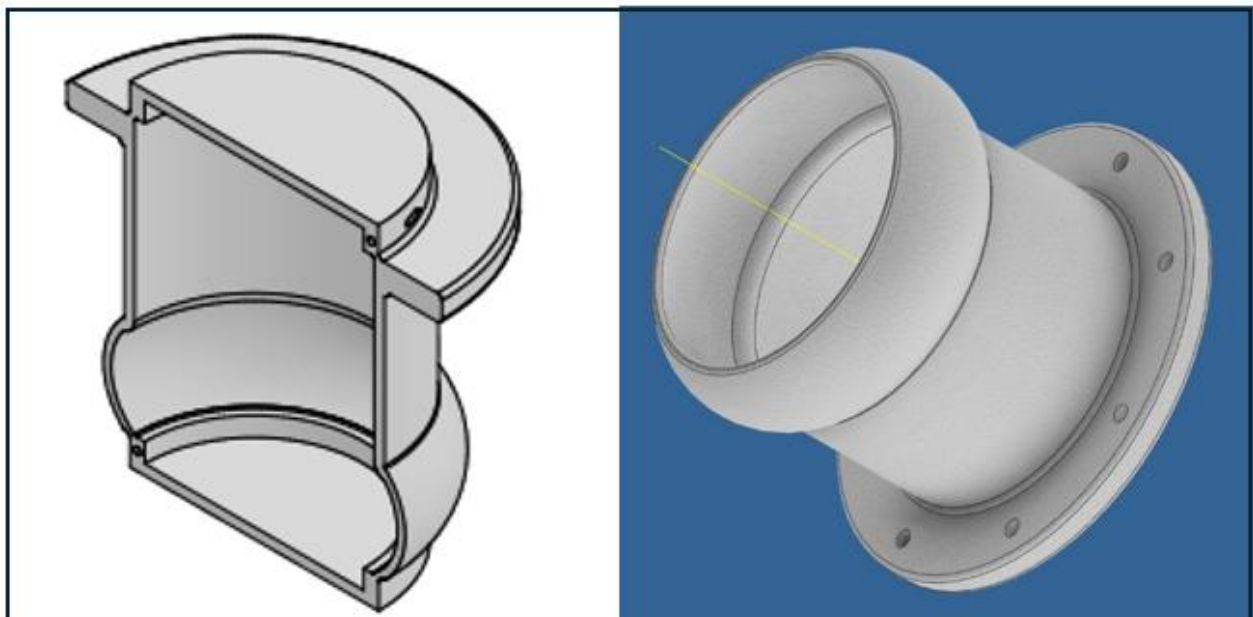
Los resultados evidenciados en la Tabla 3 presentan mejoras significativas en el proceso monolítico, reducción del tiempo total requerido para las operaciones post-moldeo, que pasa de 17 a 10 minutos (tiempo estimado que un operario debería tardar en remover llenadera, mazarota y perforación de brida).

Con una disminución de 41.2% de tiempo, esta producción impacta directamente en la capacidad productiva de 3.53 piezas/h a 6 piezas/h, equivaliendo a un aumento aproximado del 70%. Finalmente, la empresa se estaría ahorrando USD 11.33 de USD 40, siendo un 28.33% del precio de venta por cada acople terminado.

### 3.5. Resultados en modelado CAD (molde monolítico y pieza terminada)

**Figura 3.5**

*Molde monolítico y resultado de pieza fundida finalizada*



### 3.6. Análisis del horno actual

Este análisis permitió identificar las principales limitaciones térmicas que inciden directamente en la eficiencia y consumo de un horno a gas GLP. En la Figura 3.6 se muestra los únicos materiales que componen el horno actual.

Figura 3. 6

*Materiales que componen el horno de fundición actual*

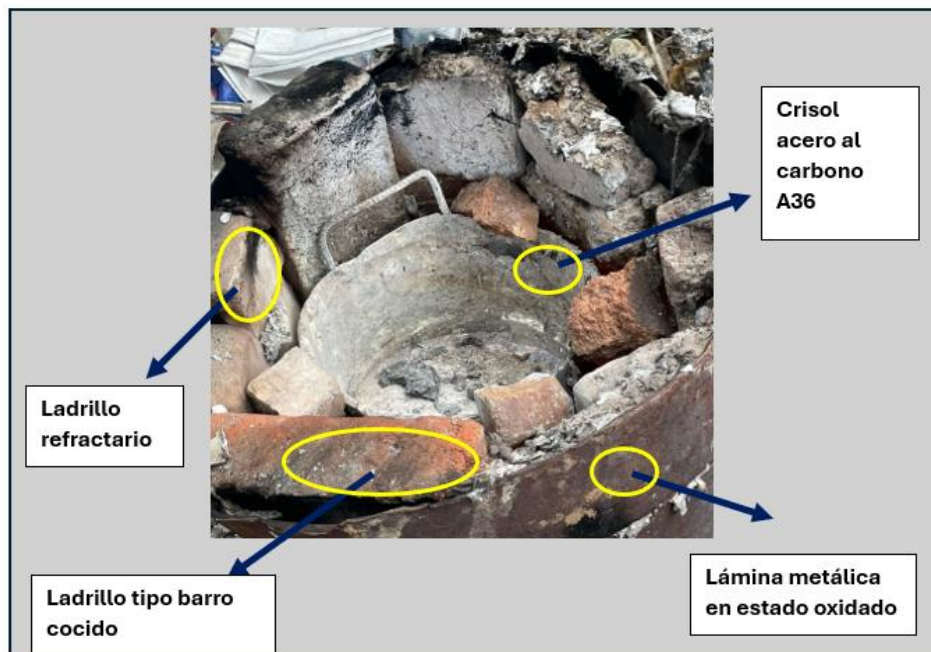
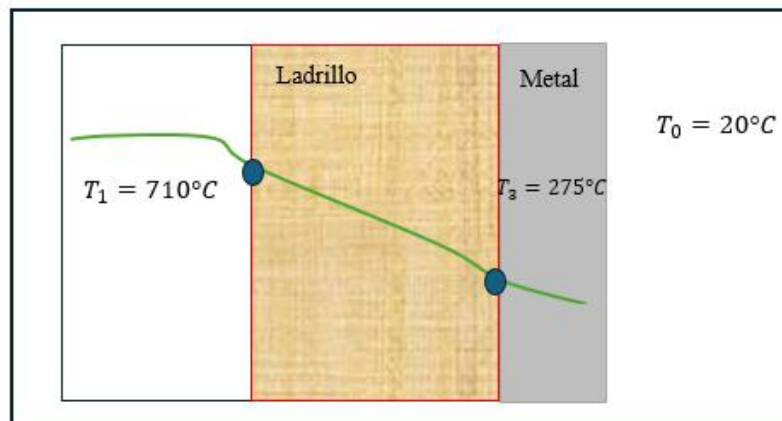


Figura 3. 7

*Esquema de las capas que componen el horno*



### 3.6.1. Análisis de cantidad de carga a fundir por tanda

En cada jornada de operación se consideró un máximo aproximado de 220 lb de carga y 10% de escoria, con un consumo de un poco más de dos cilindros de gas GLP domésticos por día (Apéndice B).

**Tabla 3. 6**

*Resultado de carga de aluminio por tanda en función de la capacidad efectiva del crisol*

Parámetro	Símbolo	Unidad	Valor
Volumen total del crisol	$V_{\text{crisol}}$	$\text{m}^3$	0.0172
Factor de operación segura	$f_{\text{op}}$	-	0.75
Volumen efectivo de operación	$V_{\text{op}}$	$\text{m}^3$	0.0129
Densidad del aluminio líquido	$\rho_{\text{Al}}$	$\text{kg}/\text{m}^3$	2375
Masa máxima de aluminio líquido	$m_{\text{liq}}$	kg	30.64
Factor de pérdidas (escoria y rebabas)	$f_{\text{pérdida}}$	-	0.90
<b>Masa máxima de chatarra admisible</b>	$m_{\text{máxima}}$	<b>kg</b>	<b>34.01</b>
<b>Carga real de aluminio por tanda</b>	$m_{\text{real}}$	<b>kg</b>	<b>33.33</b>

La carga de aluminio tipo chatarra A360 y aleaciones 6061 se definió en función de la capacidad volumétrica efectiva del crisol y de pérdidas propias de proceso. Se adoptó un factor de operación de 75% del volumen del crisol para evitar desborde del metal.

Con una masa máxima de 34.01 kg, la carga operativa de 33.33 kg por tanda se encuentra dentro de este límite, garantizando una operación segura y estable de operación.

### 3.6.2. Entrada del flujo de llama (GLP)

La Figura 3.8 muestra la entrada de gas GLP al horno de manera frontal, dicha ubicación provoca un gradiente térmico elevado en una sección de la pared del crisol, generando expansiones-contracciones repetitivas, afectando la vida útil del crisol y afectan la estabilidad térmica del aluminio fundido.

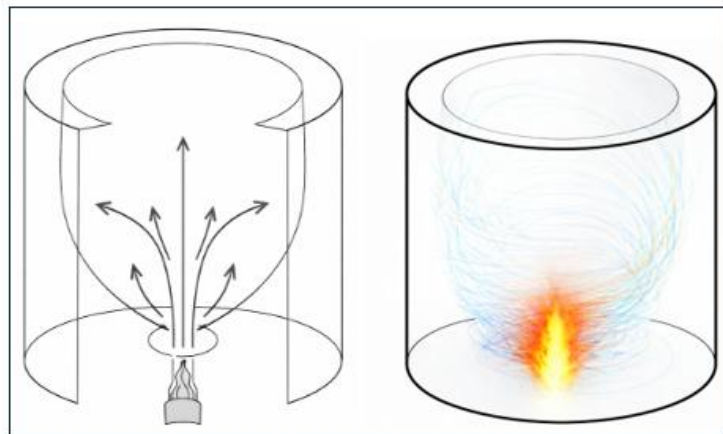
**Figura 3. 8**

*Entrada frontal de la llama*



**Figura 3. 9**

*Demostración física de líneas de calor de manera frontal hacia el horno actual*



### 3.6.3. Resultados de pérdidas de calor

En los cálculos que se muestran en Apéndice B, identificaron cuatro rutas principales de disipación térmica, base inferior, cuerpo, parte superior y gases de combustión.

Los resultados mostrados en la Tabla 3.7 se centran en las pérdidas totales de calor y porcentajes en cada zona estructural del horno.

**Tabla 3.7**

*Resultados de pérdidas de calor del horno actual*

Zona del horno	Símbolo	Pérdida (kW)	Pérdidas en porcentajes (%)
Parte inferior	$Q_{inferior}$	0.49	1.21
Cuerpo	$Q_{cuerpo}$	6.32	15.67
Parte superior	$Q_{superior}$	10.27	25.46
Gases de combustión	$Q_{gases}$	23.26	57.66
<b>Total</b>		<b>40.34</b>	<b>100.00</b>

Estos resultados confirmaron que más del 83% en las pérdidas térmicas se encuentran en la parte superior. Con una pérdida de 10.27 kW correspondientes a la transferencia directa de radiación y convección y 23.26kW al arrastre de calor por los gases de combustión. Estos resultados respaldan la importancia en la incorporación de una tapa térmicamente aislada.

### 3.6.4. Resultados de energía útil y suministrada

Las Tablas 3.8 y 3.9 de resultados permitieron cuantificar la energía requerida para llevar a cabo el proceso de fundición del aluminio y evaluar el aprovechamiento térmico del horno.

**Tabla 3. 8***Resultados de calor útil para el proceso de fusión*

Parámetro	Símbolo	Valor (MJ)
Calor para elevar temperatura del Al sólido	$q_s$	17.39
Calor latente de fusión del Al	$q_L$	13.23
Calor para elevar temperatura de vertido	$q_v$	4.32
Calor total útil absorbido por el Al	$q_{\text{útil,fusión}}$	34.94
Calor a absorbido por el crisol	$q_{\text{crisol}}$	6.14

**Tabla 3. 9***Resultado de potencia útil de fundición*

Parámetro	Símbolo	Valor
Calor útil total del proceso de fundición	$Q_{\text{útil,fundición}}$	41.08 MJ
Tiempo efectivo de operación	$t_{op}$	93 min
Potencia útil de fundición	$Q_{\text{útil,fundición}}$	7.36 kW

El conjunto de resultados energéticos obtenidos, evidencia que el tiempo de 93 minutos para el proceso de vertido, es el indicador más “visible” del desempeño del horno.

La energía útil total alcanzada de 41.08MJ implica una tasa real de aprovechamiento energético baja, esto significa que la energía del combustible no se convierte eficientemente en calentamiento del metal, sino que se disipa por pérdidas.

### 3.6.5. Resultados de eficiencia global del sistema actual

Se buscó resultados reales y tóricos que permitan entender el comportamiento del sistema. Con una potencia suministrada de parte del combustible de  $Q_{\text{combustible}} = 69.47\text{kW}$  y la potencia útil para fundir 33.33kg de Al, se obtuvo:

$$\eta_{\text{real}} = \frac{7.36 \text{ kW}}{69.47\text{kW}} = 0.11$$

$$\eta_{\text{real}} = 11\%$$

Esta eficiencia “real” indica que aproximadamente el 1/10 de la potencia química del GLP llega como calor útil al metal más el crisol y el 89 % restante se van en pérdidas al ambiente.

La eficiencia tórica respecto al balance del sistema modelado no usa el combustible, sino el “total” entre potencia útil y pérdidas:

$$\eta_{\text{teórica}} = \frac{7.36\text{kW}}{47.7\text{ kW}} = 0.15$$

$$\eta_{\text{teórica}} = 15\%$$

Dando como resultado una desigualdad de 4% entre ambas. ¿Pero por qué surgió esta diferencia?

Esta diferencia porcentual nos indica que 21.77 kW de la potencia del combustible no está capturada dentro del balance térmico de pérdidas-útil, ya que un modelo no homogéneo genera puntos calientes que aumentan pérdidas reales.

Existen también pérdidas adicionales no consideradas explícitamente como:

- Calentamiento de chatarra con humedad/óxido
- Energía asociada a escoria y reacción superficial
- Perdidas de gas por el puerto del quemador

### **3.7. Análisis de materiales del horno mejorado**

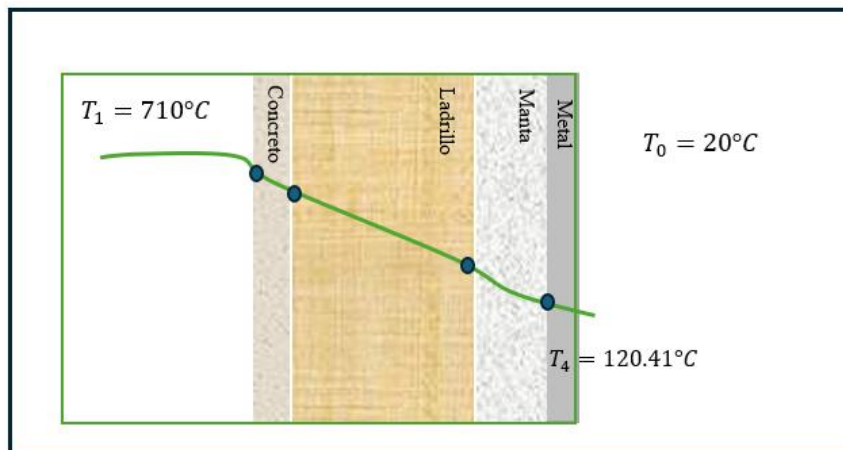
A partir de las deficiencias identificadas en el horno actual, se plantea el análisis de un horno mejorado orientado a incrementar la eficiencia térmica y seguridad operativa.

Con el objetivo de limitar la temperatura superficial externa a un valor inferior a  $50^{\circ}\text{C}$ , garantizando condiciones adecuadas de seguridad operativa, se planteó una primera configuración solo de tres capas con el fin de evitar un volumen grande en la estructura (Figura 3.10):

1. *Concreto refractario*
2. *Ladrillo aislante refractario*
3. *Fibra cerámica*

**Figura 3. 10**

*Configuración multicapa (concreto, ladrillo aislante, fibra cerámica)*



Con los valores de la resistencia por conducción en las capas y la resistencia en el exterior debido a combinación de convección y radiación para un espesor de 25, 38 y 51 mm de manta cerámica, se obtuvieron los siguientes resultados:

$$R_{\text{conducción}} = 0.50879 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{ext}} = 0.08520 \text{ K/W}$$

$$Q = 1178.46 \text{ W}$$

$$T_4 = 120.41^{\circ}\text{C}$$

**Tabla 3. 10**

*Resultados para espesores disponibles de mantas (25mm,38mm y 51mm)*

<b>Manta</b>	<b>R<sub>manta</sub> (K/W)</b>	<b>R<sub>ext</sub> (K/W)</b>	<b>R<sub>total</sub> (K/W)</b>	<b>Q(W)</b>	<b>T<sub>4</sub> (°C)</b>
25 mm	0.10133	0.08520	0.59400	1178.46	<b>120.41</b>
38 mm	0.15098	0.08192	0.64036	1093.14	<b>109.55</b>
51 mm	0.19875	0.07888	0.68509	1021.77	<b>100.60</b>

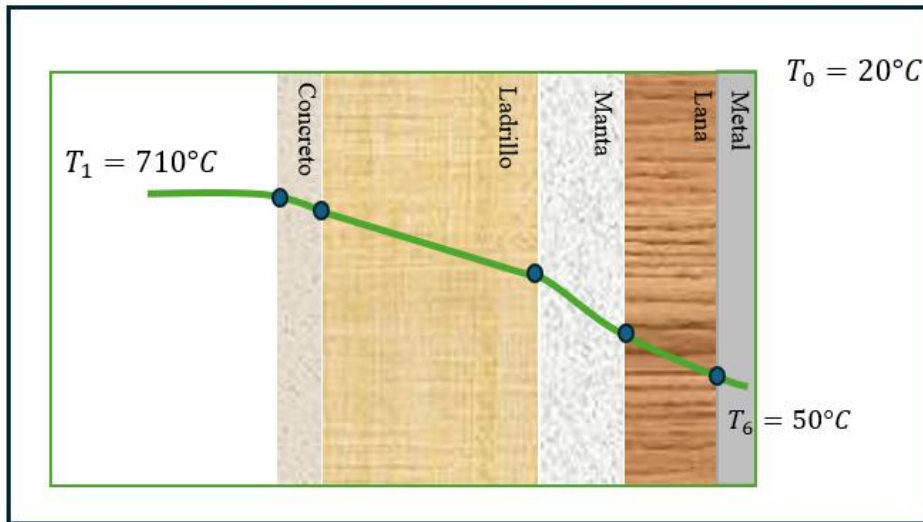
Dado que los resultados de transferencia de calor mostraron temperaturas superficiales externas ampliamente excedentes al criterio planteado (Tabla 3.10), se aplicó una capa adicional de lana de roca entre la manta cerámica y el metal, opción viable debido a su capacidad para soportar temperaturas elevadas y condiciones más exigentes (Apéndice D).

La nueva configuración (Figura 3.11) se planteó de cuatro capas tomando en cuenta un espesor intermedio de manta cerámica (38 mm) y la lana de roca de 50 mm, disponible en el mercado local:

1. *Concreto refractario*
2. *Ladrillo aislante refractario*
3. *Fibra cerámica*
4. *Lana de Roca*

**Figura 3. 11**

*Configuración multicapa (concreto, ladrillo aislante, fibra cerámica y lana de roca)*



Esta configuración arrojó un resultado de:

$$R_{\text{conducción}} = 0.55844 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{exterior}} = 1.07841 \text{ K/W}$$

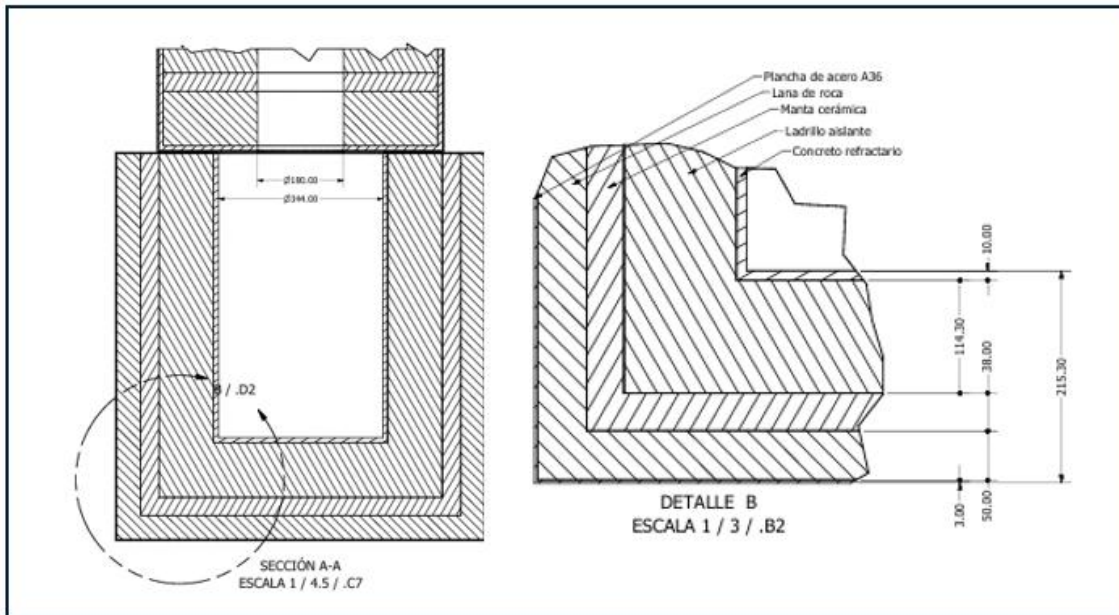
$$Q = 409.79 \text{ W}$$

$$T_5 = 49.23 \text{ }^\circ\text{C}$$

La cual, favoreció la disminución de temperatura a tal punto de cumplir el criterio establecido de  $50^\circ\text{C}$ , esto se debe a que la conductividad térmica de la lana de roca es 6.18 veces menor ( $0.034 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ) que la manta de fibra cerámica ( $0.21 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ ).

**Figura 3. 12**

*Vista de capas térmicas del horno mejorado*



### 3.8. Análisis de crisol

Este apartado se enfoca en el análisis comparativo entre el crisol actual (acero A36) y uno de grafito-arcilloso, para evidenciar diferencias significativas en su comportamiento térmico y económico. Para este análisis, partimos con los resultados de la energía suministrada en cada crisol mostrados en la Tabla 3.11.

**Tabla 3. 11***Resultados de energías útiles por colada según material de crisol*

Componente de energía (por colada)	Símbolo	Crisol A36 (MJ)	Crisol grafito-arcilloso (MJ)
Calor para elevar temperatura del Al (20→600 °C)	q <sub>s</sub>	17.39	17.39
Calor de fusión del Al	q <sub>L</sub>	13.23	13.23
Calor para vertido / sobrecalentamiento (600→710 °C)	q <sub>liq</sub>	4.32	4.32
Subtotal aluminio	q <sub>Al</sub>	34.94	34.94
Calor para elevar temperatura del crisol (20→710 °C)	q <sub>útil,A36</sub>	6.14	1.98
Energía útil total por colada	q <sub>útil</sub>	41.08	36.92

**3.8.1. Ahorro energético útil**

De la ecuación (C.2), se obtuvo:

$$\Delta q = q_{\text{útil,A36}} - q_{\text{útil,grafito}} \text{ [J]}$$

$$\Delta q = 41.08 \text{ MJ} - 36.92 \text{ MJ} = 4.16 \text{ MJ}$$

Ese resultado implica que, al emplear un crisol de grafito, se requiere 4.16MJ menos de energía útil por colada, lo que respalda sus buenas propiedades térmicas.

Para expresar este ahorro en términos de combustible, se calculó la masa equivalente de GLP evitada, empleando una eficiencia global típica del sistema horno-quemador del 30%, ajustable a un rango típico entre 20% a 40%, reportado para hornos de crisol a gas (ASM International, 2008).

De la ecuación (2.20):

$$m_{\text{GLP,ahorro}} = \frac{4.16 \text{ MJ}}{(0.30)(45605.6 \text{ kJ/kg})}$$

$$m_{\text{GLP,ahorro}} = 0.304 \text{ kg}$$

### 3.8.2. Ahorro económico de GLP, según el crisol

El valor promedio del cilindro domestico en Ecuador es de USD 2.50 con una masa de 15kg de contenido (0.1667 USD/kg), para 3 tandas durante el día y para un promedio de 4 días por semana, tendremos 12 colados en una semana:

**Tabla 3. 12**

*Resultados de ahorro de combustible y costo por tipo de crisol*

Concepto	Crisol A36	Crisol de grafito	Ahorro obtenido
Energía útil por colada [MJ]	41.08	36.92	<b>4.16 MJ</b>
Consumo equivalente de GLP [kg/colada]	3.002	2.698	<b>0.304 kg</b>
Ahorro económico por colada [USD/colada]	0.500	0.449	<b>0.0507 USD</b>
Ahorro económico semanal (12 coladas) [USD/sem]	6	5.388	<b>0.61 USD</b>

De este modo, se obtuvo un ahorro de 0.304 kg de GLP por colada, equivalente a un ahorro económico aproximado de 0.61 USD semanal.

### 3.8.3. Costo de reparación de crisol A36

La ventaja en la alternativa del crisol A36, fue que se puede reparar en la propia empresa (Figura 3.13). Esta reparación suele darse de manera periódica cada 2 semanas, siendo un costo de aproximadamente USD 35.

$$\text{Costo}_{\text{semanal}}^{\text{reparación}} = 17.5 \text{ USD/semana}$$

Se estimó un gasto semanal aproximado sumando el mantenimiento y consumo de GLP.

$$\text{Costo}_{\text{semanal}} = 18.11\text{USD/semana}$$

**Figura 3. 13**

*Reparación de base de crisol (afectación por reacción del aluminio y llama frontal del quemador)*



#### **3.8.4. Recuperación económica al reemplazar un crisol grafito-arcilla**

Para un crisol de grafito-arcilla industrial, se estimó un costo aproximado de USD 900, lo cual se fundamenta en listados comerciales de proveedores internacionales de refractarios, donde se reportan precios unitarios cercanos a este valor (Zhucheng Jinde Refractory Co,Ltd, 2024).

$$\text{Tiempo}_{\text{recuperación}} = \frac{900\text{USD}}{1341.72 \text{ USD/semana}}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{recuperación}} = 8 \text{ meses}$$

En consecuencia, un crisol grafito-arcilla resulta económicamente viable, con una recuperación en la inversión en el corto-mediano plazo en menos de un año.

### 3.9. Especificaciones geométricas y correcciones estructurales

Los espesores del cuerpo, base y tapa, depende mucho de las capas que ya se determinaron en el Apéndice D, esto a su vez, junto al crisol, ayudó a definir la geometría del horno.

Se consideró una holgura lateral de 5 cm por lado para la circulación uniforme de gases alrededor del crisol (Ramos & Quispe, 2021, p. 45).

Para estimar la altura, se consideró una elevación del crisol de unos 10 cm como valor óptimo, y como holgura superior, 10 cm hacia la tapa.

**Tabla 3. 13**

*Resultados geométricos del horno mejorado*

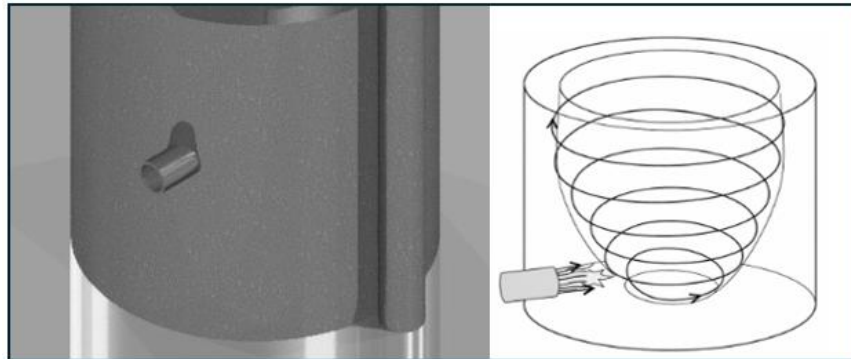
Parámetros	Valor
Altura total	102.46 cm
Diámetro	77.46 cm
Espesor de pared de cuerpo	21.23 cm
Espesor de base	21.23cm
Espesor de tapa	21.23cm
Espesor de lámina metálica	0.3 cm
Holgura de la cámara	5 cm

#### 3.9.1. Ingreso de llama al horno

Para que la distribución de calor en la cámara del horno mantenga un flujo uniforme al rededor del crisol, se estableció un ingreso tangencial de la llama de alimentación, a diferencia del horno actual que mantiene un ingreso frontal.

**Figura 3. 14**

*Demostración física de líneas de calor de manera tangencial*



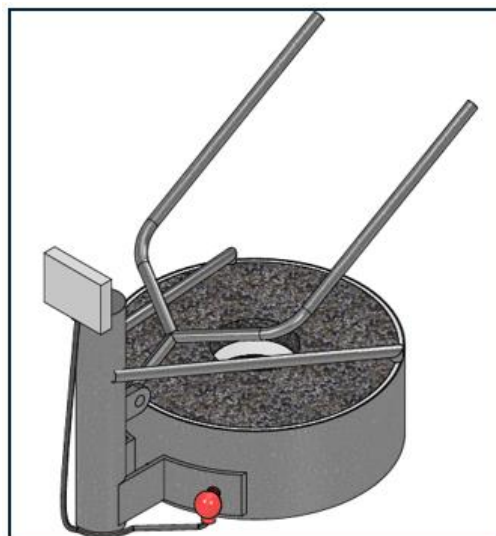
Esta configuración ubicada a 23 cm de la base evitará deterioro en crisol debido a sobrecalentamientos en un solo punto frontal (Figura 3.14).

### **3.9.2. Incorporación de tapa**

En base a la selección más práctica mostrada en el capítulo 2 para la integración de una tapa en horno, se consideró las mismas capas de aislamiento con la finalidad de establecer seguridad al operario, dando un espesor igual a la base (Figura 3.15).

**Figura 3. 15**

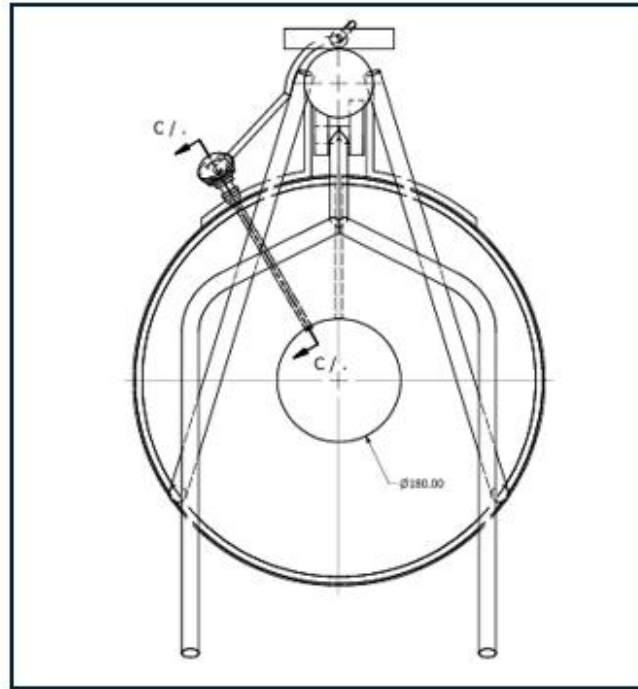
*Tapa de horno con sistema de apertura mediante palanca*



Esas palancas están conectadas a un eje guía de traslación lateral, con un agujero en el centro y un diámetro óptimo de operación de 18 cm simulando una chimenea (Figura 3.16).

**Figura 3. 16**

*Agujero central de 18cm, simulando chimenea*



### **3.10. Análisis térmico del horno mejorado**

Si bien el análisis de un horno de crisol de grafito-arcilloso es el ideal para mejorar términos de eficiencia y ahorro, el requerimiento del cliente en la actualidad es de mantener el crisol de acero al carbono, por su facilidad de reparación y adquisición.

Por lo que, los resultados de potencia y pérdidas se relacionaron integrando nuevamente con crisol de acero A36.

**Tabla 3. 14***Balance térmico de potencia en un tiempo de 60 minutos*

Concepto	Expresión	Resultado
Potencia útil promedio	$Q_{\text{útil,fundición}}$	11.41 kW
Pérdidas totales (paredes + inferior + superior + agujero)	$Q_{\text{pérdidas}}$	1.86 kW
Potencia total requerida (balance)	$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{pérdidas}} + Q_{\text{útil,fundición}}$	13.27 kW

**Tabla 3. 15***Resultados de pérdidas de calor del horno mejorado*

Zona del horno mejorado	Símbolo	Pérdida (W)	Pérdidas en porcentajes (%)
Parte inferior	$Q_{\text{inferior}}$	153.57	8.23
Cuerpo	$Q_{\text{cuerpo}}$	409.79	21.96
Tapa	$Q_{\text{Tapa}}$	112.31	6.02
Pérdida en agujero	$Q_{\text{agujero}}$	1190	63.78
<b>Total</b>		<b>1865.67</b>	<b>100.00</b>

Los resultados evidencian que, tras incorporar un sistema multicapa de 4 paredes, la vía dominante de pérdida térmica se concentra en el agujero superior representando el 63.78% del sistema. Esta distribución es consistente con un diseño donde las superficies sólidas han sido adecuadamente aisladas y la principal vía de fuga térmica corresponde a una abertura necesaria para la operación del horno.

En términos de eficiencia, resultó  $\eta_{\text{horno}} = 85\%$ , este valor nos dice que, la fusión en el sistema absorbió la mayor parte de la energía suministrada, por lo que, la energía se destinó principalmente a elevar entalpia del metal y del crisol. Para obtener un valor más real, es recomendable validar con medición experimental de consumo de GLP como se lo determinó en

el horno actual; dicho eso, es probable obtener un valor entre el 77%, que es el valor físicamente más representativo del proceso para un horno de este tipo.

### 3.11. Comparación en consumo de combustible (actual vs mejorado)

Los resultados de consumo en la Tabla 3.16, indican que en una producción constante de 33.33 kg de aluminio por tanda, el horno viejo consume 8.50 kg de GLP, mientras que el horno mejorado consume 1.05 kg en 60 minutos. Esto representa un ahorro directo de 7.45 kg por tanda. Bajo un régimen de tres tandas diarias, el ahorro asciende a 22.35 kg diarios, es decir, aproximadamente 23.84 cilindros al mes. En términos económicos, el ahorro mensual se estima de 59.6 USD/mes.

**Tabla 3. 16**

*Consumo de GLP y ahorro con 16 días al mes*

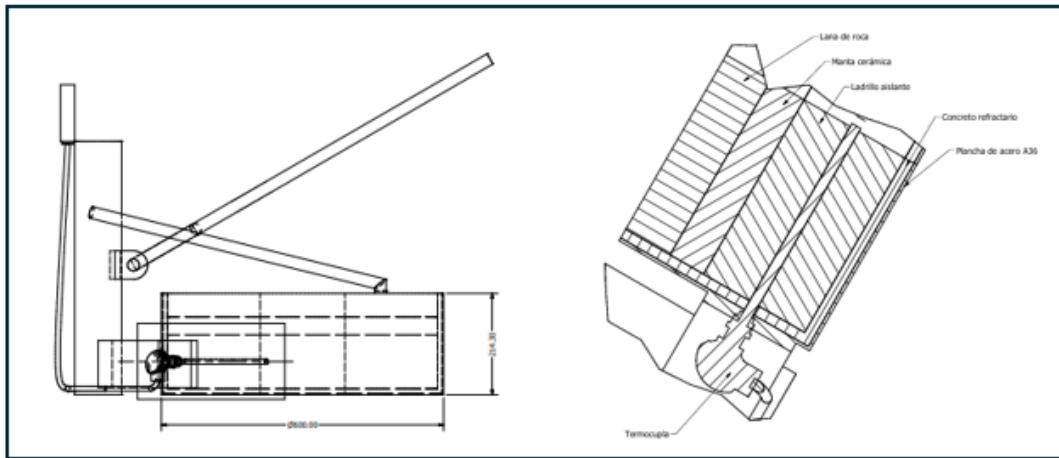
Concepto	Horno viejo	Horno mejorado	Ahorro (actual – mejorado)
Tiempo por tanda	93 min (1.55 h)	60 min (1.00 h)	—
GLP por tanda	<b>8.50 kg</b>	<b>1.05 kg</b>	<b>7.45 kg</b>
Consumo horario	5.48 kg/h	1.05 kg/h	4.43 kg/h
Costo por tanda	1.42 USD	0.18 USD	<b>1.24 USD</b>
GLP por día (3 tandas)	<b>25.50 kg/día</b>	<b>3.15 kg/día</b>	<b>22.35 kg/día</b>
Cilindros/día (15 kg)	1.70	0.21	<b>1.49</b>
Costo por día	4.26 USD/día	0.53 USD/día	<b>3.73 USD/día</b>
GLP por mes (16 días)	<b>408.0 kg/mes</b>	<b>50.4 kg/mes</b>	<b>357.6 kg/mes</b>
Cilindros/mes (15 kg)	27.20	3.36	<b>23.84</b>
Costo por mes	68.0 USD/mes	8.4 USD/mes	<b>59.6 USD/mes</b>

### 3.12. Análisis para el control térmico de la colada

Para indicar la temperatura del metal, se estableció un sistema integrado de una termocupla tipo K industrial con cabezal de conexión, atravesando la capa de ladrillo de manera paralela el radio de la tapa (Figura 3.17).

**Figura 3. 17**

*Ubicación de termocupla a lo largo de la capa de ladrillo aislante*



Se adoptó un rango conservador de  $\Delta = 50$  a  $120^{\circ}\text{C}$  para una punta de la termocupla, sobresalida entre 1 a 2 cm, lea la temperatura en el perímetro del agujero central cerca al crisol. Ya que esta configuración no toma la lectura del metal directamente, se hizo un sesgo sistemático,  $T_{\text{metal}} = T_k + \Delta$ .

Donde se consideró el caso más exigente de  $\Delta = 120^{\circ}\text{C}$ , con la finalidad que la lectura de la termocupla indique un valor alerta y mantener el control de llama.

Por lo tanto, la configuración del PID resultó:

- Punto caliente:  $590^{\circ}\text{C}$ , con un margen de  $\pm 10^{\circ}\text{C}$
- La alarma se alerta a una temperatura alrededor de los  $600^{\circ}\text{C}$

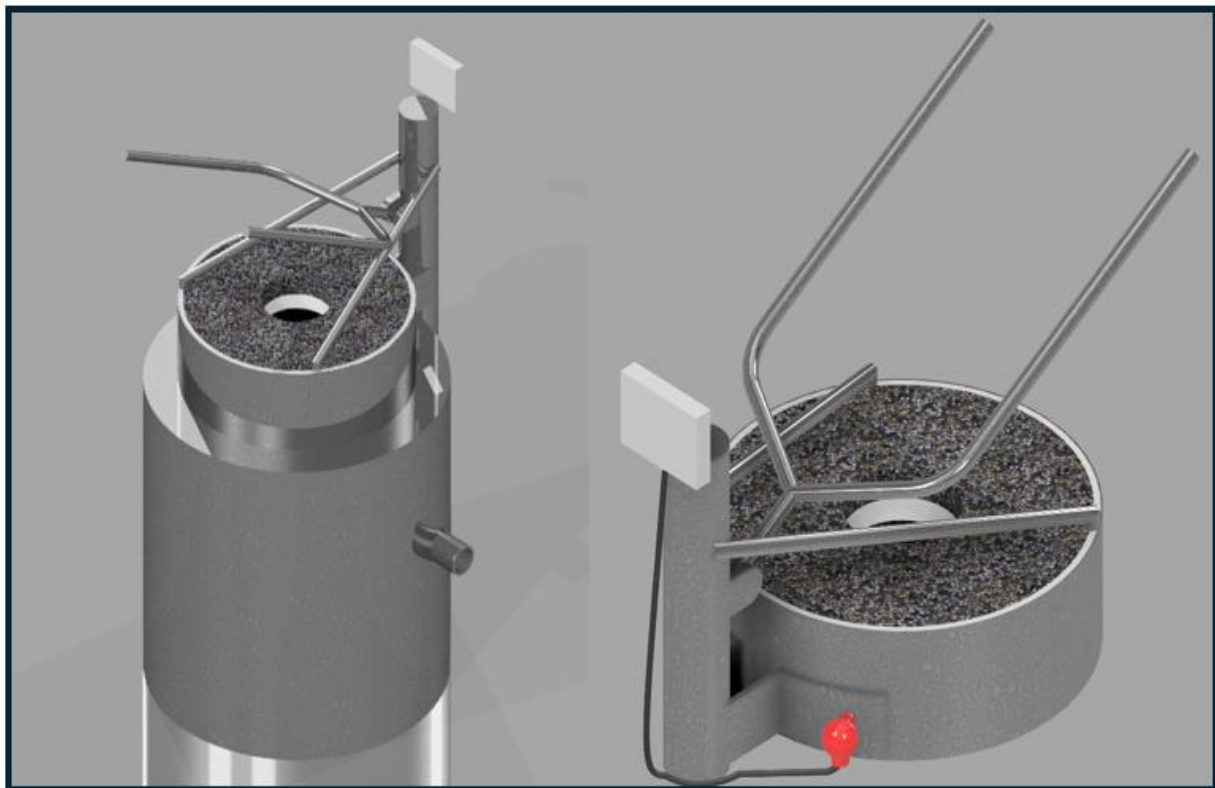
- Control de la salida de gas GLP para controlar llama cuando la temperatura llegue a los 580°C

Este método garantizará un  $T_{\text{metal}} \leq 710^{\circ}\text{C}$ , evitando sobrecalentamiento y, por ende, daños por porosidad en las piezas acabadas.

### 3.13. Resultado en modelado CAD del horno mejorado

**Figura 3. 18**

*Horno con estructura térmica mejorada, alimentación de calor tangencial, tapa integrada y control de temperatura.*



**Tabla 3.17 1***Costos de materiales para el horno mejorado*

<b>Cantidad (UND.)</b>	<b>Descripción</b>	<b>Valor Unitario (USD)</b>	<b>IVA (15%)</b>	<b>Valor total (USD)</b>
2	Plancha laminada ASTM A36, acabado (Acero negro). 2010x2440x3 mm	79,2	11,88	182.16
2	Concreto refractario CONCRAX, Tmáx 1500°C, 25 kg	47,08	7,06	108.28
3	Manta cerámica 1260 3660x610x38 mm	135	20.25	465.75
145	Ladrillo refractario aislante en arco ER IFB 2600, Tmáx 1400°C 9"x1"x 4 ½ x 2 ½	67,02	10,05	77,07
3	Lana de roca 70kg/m <sup>3</sup> 50mm de espesor, 1200X600	32	4.80	110.4
1	Crisol grafito-arcilloso de 40 kg de capacidad	900		900
1	Controlador PID REX-100 de RK Instrumentes Top -199.9°C a 1372°C	45	6.75	51.75
1	Termocupla tipo K industrial THL TCK-BRRS01, Top -200°C a 1260°C	110		110
1	Quemador de forja de propano tipo Venturi 100.00BTU≈29.3kW	120		120
			<b>Total, costos materiales</b>	<b>2125.41</b>

## Capítulo 4

## **4.1 Conclusiones y recomendaciones**

### **4.1.1. Conclusiones**

Este estudio logró mostrar la optimización en la producción de acoples de 6” usando un modelo monolítico entre las dos piezas que la componen (brida y adaptador). Mientras que, el fortalecimiento estructural del horno se llevó a cabo con un estudio general de su actualidad, planteando mejoras técnicas y térmicas con el fin de eliminar daños en piezas finales e inseguridad operaria.

Esta integración tipo monolítica se configuró con criterios tal que, la geometría estándar ya establecida para la aplicación de válvulas de paso, no se altere. La seguridad de piezas con buen acabado se logró seleccionando una mazarota tipo “abierta”, colocada en el punto más crítico de temperatura (brida), con la finalidad de eliminar fallas por rechupe. Garantizando un resultado de pieza en conjunto y con mejor acabado.

Se comparó primero el proceso de fundición mostrando un desfase poco notorio en cuanto al tiempo de moldeo, ya que en el proceso por separado se puede garantizar hasta 4 adaptadores en un solo moldeo, pero la elaboración una en una de la brida contrarresta esa ventaja. Mientras que, en el proceso monolítico, las piezas salen juntas, pero se requiere repetir todo proceso para cada moldeada. El enfoque principal para determinar mejoras en la elaboración de los acoples recae en el proceso post-moldeo; donde la mayor ventaja fue la eliminación de cortes en el adaptador para luego soldarlos, reemplazando procesos de mecanizados básicos que no requieran conocimientos especializados. Este enfoque mejorado dio como resultado un aumento de productividad del 70%, y un ahorro del 28.33% de su valor de venta por el mercado, es decir, USD 11.33.

Se evaluó el desempeño del horno actual desde su estructura, hasta su eficiencia. Para ello, se plantearon conocimientos de transferencia de calor, donde su mayor porcentaje de pérdida se dio en la parte superior debido a la falta de una tapa térmica, siendo este el 83% de su pérdida total (33.53 kW). La diferencia entre la eficiencia téorica (15%) y la eficiencia real (11%) evidenciaron el impacto de las pérdidas inherentes debido al deterioro estructural actual. Se determinó que la mejor opción es un crisol de grafito-arcilloso, y no el de acero A36, dando un ahorro de combustible por colada de 0.61 USD/semanal. Pese a que ese ahorro es relativamente bajo, su enfoque fue en la obtención del producto, ya que se requiere importación. Por dicha desventaja la empresa decide seguir manejando un crisol de mismo material actual, pese a que el costo de su mantenimiento es de 18.11 USD/ semanal, debido a su rápido deterioro en la base. Visto desde un punto de recuperación económica, se concluyó que, en aproximadamente 49.6 semanas la inversión de USD 900 (costo de crisol de grafito-arcilloso), se recuperará. En base a ese análisis actual, se implementaron componentes multicapas de materiales térmicos y una integración de tapa que garantizaron un alza en su eficiencia teórica de 85% y un ahorro de consumo de combustible de 8.50kg a 1.05kg por cada tanda, siendo esto un valor de USD 59.6 al mes. Este ahorro es teórico, se requiere de una lectura real del consumo de combustible a un tiempo de 60 minutos.

Finalmente, se estableció un control de temperatura, integrando una termocupla tipo K de manera paralela a la tapa del horno a lo largo de la capa de ladrillo aislante, sobresaliendo 2 cm hacia el agujero, con la finalidad de captar valores de temperatura lo más cerca a la boca del crisol. Para el obtener el valor de temperatura aproximado de la colada, se realizó un sesgo sistemático que brinda una temperatura de alerta en PID, brindando una temperatura ideal de vaciado, evitando sobrecalentamiento del metal y fallos por porosidad en las piezas y el riesgo de dependencia de

un operario experimentado. Esta aplicación de mejoras determinó un costo de materiales aproximadamente USD 2125.41.

#### **4.1.2 Recomendaciones**

Se recomienda extender el uso del sistema monolítico a otros accesorios que requieran operaciones post moldeo complejas, para consolidar operaciones de mecanizado básicas, permitiendo consolidar los incrementos de productividad y reducción de costos evidenciados en el estudio.

Aunque las mejoras implementadas garantizan años de buen uso, se recomienda realizar inspecciones periódicas del sistema de aislamiento térmico y de la tapa integrada para la continuidad de la eficiencia térmica

Así mismo, se aconseja implementar un programa de mantenimiento preventivo en válvulas y conexiones del sistema de combustión, con el fin de minimizar fugas de mas que impacten el consumo.

Es recomendable validar con medición experimental del consumo de GLP como se lo determinó en el horno actual, para obtener un valor más cercano a la eficiencia real del sistema mejorado.

Finamente, se recomienda calibrar de forma recurrente el sistema de control de temperatura y el sensor tipo K, para garantizar lecturas confiables que aseguren un vaciado controlado y piezas libres de defectos por sobrecalentamiento.

## Referencias

- American Foundry Society. (2016). Metal casting manual (15th ed.). American Foundry Society.
- American Foundry Society. (2023). AFS Institute course catalog – Molding methods / Sand control modules. <https://www.afsinc.org/AFSInstituteCatalog>
- ASM International. (2008). ASM handbook, Volume 15: Casting. ASM International.
- ASTM International. (2018). ASTM A36/A36M: Standard specification for carbon structural steel. ASTM International.
- Cometal. (2025, junio 10). Material refractario: protección esencial para hornos industriales de alta temperatura. <https://cometal.es>
- Durmuş, M., Çetin, R., Aksoy, S., & Kaçar, R. (2024). Evaluation of Fe content on the fluidity of A356 aluminum alloy by a new fluidity index. *International Journal of Metalcasting*, 18(4), 1527–1541. <https://doi.org/10.1007/s40962-024-01396-4>
- Empresa Pública Petroecuador. (2024, junio 6). GLP, gasolina natural y gas combustible se obtienen del gas asociado.... <https://www.eppetroecuador.ec/?p=22836>
- European Aluminium. (2024, November 6). Sector shows environmental progress and calls for bold policies to decarbonise further. *Aluminium Today*. <https://aluminiumtoday.com/news/european-aluminium-sector-shows-environmental-progress-and-calls-for-bold-policies-to-decarbonise-further>
- Gómez Escandell, E. (2021). Partition of castings into sections and computation of their casting module (Master's thesis). Universitat Politècnica de Catalunya. <https://upcommons.upc.edu/bitstreams/37ad4a8e-cfd0-43d6-8ffa-5d5f7d2b8b6d/download>

- Heywood, J. B. (1988). *Internal combustion engine fundamentals*. McGraw-Hill.
- Holman, J. P. (2010). *Heat transfer* (10th ed.). McGraw-Hill.
- Incropera, F. P., DeWitt, D. P., Bergman, T. L., & Lavine, A. S. (2017). *Fundamentals of heat and mass transfer* (8th ed.). John Wiley & Sons.
- International Electrotechnical Commission. (2022). ISO 13577-4:2022—Industrial furnaces and associated processing equipment—Safety—Part 4: Protective systems. <https://standards.iteh.ai/catalog/standards/sist/970fa2f3-8200-491c-9ee5-bbe4cc704245/iso-13577-4-2022>
- International Organization for Standardization. (2015). ISO 14001:2015—Environmental management systems—Requirements with guidance for use. ISO.
- Jara Moreno, A. A. R. (2020). *Metodología de diseño de hornos para tratamiento térmico de piezas ferrosas* (Memoria de título). Universidad de Chile.
- Liu, G., Ren, Y., Wu, T., Ding, N., Yang, L., & Li, R. (2024). Recent advances and future trend of aluminum alloy melt purification: A review. *Journal of Materials Research and Technology*, 28, 4647–4662. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2238785424000243>
- Mar Casting. (2024, septiembre 17). ¿Cómo elegir el material refractario adecuado para tu industria? <https://marcasting.com>
- Mendoza, R. (2018). *Evaluación térmica del suelo para sistemas de intercambio geotérmico somero en la región costa del Ecuador* (Tesis de ingeniería). Escuela Superior Politécnica del Litoral.

- MISUMI USA. (2025, March 19). What is the melting point of aluminum?  
<https://us.misumi-ec.com/blog/aluminum-melting-point/>
- Morgan Thermal Ceramics. (2015). Refractory systems for aluminum melting and holding furnaces. Morgan Advanced Materials.
- Morgan Thermal Ceramics. (2022). Ceramic fiber blanket technical data sheet. Morgan Advanced Materials. <https://morganadvancedmaterials.com>
- Nabertherm GmbH. (2024). Furnaces for foundry (Catalog).  
[https://nabertherm.com/sites/default/files/2023-02/foundry\\_english.pdf](https://nabertherm.com/sites/default/files/2023-02/foundry_english.pdf)
- National Aeronautics and Space Administration. (1995). Human integration design handbook (HIDH): Thermal environment limits. <https://www.nasa.gov>
- National Fire Protection Association. (2023). NFPA 86: Standard for ovens and furnaces (2023 ed.). <https://link.nfpa.org/all-publications/86/2023>
- Oklahoma State University. (2019). Sub-surface soil temperatures (Section 13.4). OpenOKState Press. <https://open.library.okstate.edu/rainorshine/>
- Quiroga, L. (2020). Diseño e implementación de un sistema de control de temperatura para un horno de crisol a gas (Proyecto de titulación). Universidad Técnica de Ambato.
- Tempsens Instruments. (2024). K-type thermocouple: Construction, range & applications. <https://tempsens.com/blog/k-type-thermocouple/>
- Thermbond Refractories. (2022). Refractory repair and monolithic installation guide. <https://thermbond.com>

- Tienda Cerámica. (s. f.). Controlador de temperatura REX-C100.  
<https://tiendaceramica.com.ec/product/controlador-de-temperatura-rex-c-100>
- Trinks, W., Mawhinney, M. H., Shannon, R. A., Reed, R. J., & Garvey, J. R. (2004).  
Industrial furnaces (6th ed.). John Wiley & Sons.
- Trujillo Roldán, S. A. (2005). Diseño y construcción de un horno de crisol para  
fundición utilizando gas natural (Tesis de grado). Universidad San Francisco de  
Quito.
- Ulrich, K. T., & Eppinger, S. D. (2012). Product design and development (5th ed.).  
McGraw-Hill.
- Unifrax. (2023). Fiberfrax® ceramic fiber boards: High-temperature insulation.  
<https://unifrax.com>
- Vaca, J., & Corrales, F. (2021). Automatización de un horno para fundición de aluminio  
y cobre utilizando PLC y termocupla tipo K (Tesis de grado). ESPOCH.
- Vesuvio Group. (2023). Refractory castables and monolithic products.  
<https://vesuvius.com>
- Yang, B., Wang, J., Zhang, H., Li, D., & Yin, Z. (2023). Kinetic mechanism of hydrogen  
absorption of AA6111 alloy melt in different melting environments. *Metals*,  
13(2), 236. <https://doi.org/10.3390/met13020236>
- Zhucheng Jinde Refractory Co., Ltd. (2024). Graphite crucible for metal & casting  
[Product listing]. Alibaba.

## Apéndices

### Apéndice A (cálculos y tablas para mejora de moldes)

#### Definiciones geométricas

- La pieza será alineada de manera coaxial.
- Las dimensiones del adaptador y la brida no varían en sus diámetros ya estandarizados.
- Tanto la brida como el adaptador son manejados en forma cilíndrica para facilidad de análisis de rechupe, considerando la brida como un disco macizo y el adaptador un cilindro hueco.
- El radio en las uniones debe tener un aproximado de 3 a 5 mm, ya que el exceso de material en esas zonas generaría puntos calientes.

#### Tabla A 1

*Medidas ajustadas para el molde de la brida*

• Diámetro externo	25.5 cm
• Diámetro interno	16.3 cm
• Espesor	1.7 cm

#### Tabla A 2

*Medidas ajustadas para el molde del adaptador*

• Diámetro externo	17.7 cm
• Diámetro interno	16.3 cm
• Espesor	1.4 cm
• Altura	17 cm

Se había mencionado anteriormente que el adaptador pasaba por un proceso de corte para eliminar la reducción de uno de sus lados, por lo que se pretende eliminar eso y reducir la altura del adaptador. En cuanto a la brida, el diámetro interno actual es para otras aplicaciones, por la que se debe cilindrar antes de soldarla al adaptador, aumentando

el diámetro interno para que la “mariposa” de la válvula de paso no tenga problema en girar.

Dado que, para elaborar el adaptador, es necesario realizar el núcleo de tierra, debemos elaborar el molde externo con ajuste en sus extremos para colocar este núcleo de tierra.

### **Requisitos técnicos para el moldeo monolítico**

Al integrar adaptador y brida en una sola pieza colada, requiere que el llenado tenga un flujo continuo del metal hacia una cavidad única. Esta cavidad debería estar ubicada en el extremo del adaptador, o encima de la brida, zonas distintas al moldeo por separado.

En cuanto a su requerimiento dimensional, se debe mantener el diámetro de embono del adaptador, mientras que se eliminará la sección reducida en su extremo. Por otra parte, la brida únicamente se ajusta el diámetro interno para evitar rozamiento con la mariposa de la válvula.

Al momento de tener la unión directa del adaptador con la brida, generará una zona de mayor volumen, por lo que se requiere alimentación adicional (mazarota) para compensar contracción.

### **Geometrías y ubicación de mazarota para molde monolítico.**

En la geometría del acople, el punto crítico para que se genere rechupe es en la unión entre la brida y el adaptador. La brida tiene una sección gruesa, por lo que solidifica lento, mientras que el adaptador es de paredes delgadas, solidifica más rápido.

- Brida (disco macizo con espesor  $e$ )

Volumen de la brida:

$$V_{\text{brida}} = \frac{\pi}{4} (D_{e,b}^2 - D_{i,b}^2) \cdot e \text{ [cm}^3\text{]}$$
$$V_{\text{brida}} = \frac{\pi}{4} [(25.5\text{cm})^2 - (16.3\text{cm})^2](1.7\text{cm})$$

$$V_{\text{brida}} = 513.5 \text{ cm}^3$$

Área en contacto de las dos caras:

$$A_{\text{caras}} = 2 \left[ \frac{\pi}{4} (D_{e,b}^2 - D_{i,b}^2) \right] [\text{cm}^2]$$
$$A_{\text{caras}} = \frac{\pi}{2} [(25.5\text{cm})^2 - (16.3\text{cm})^2]$$
$$A_{\text{caras}} = 604.2 \text{ cm}^2$$

Área lateral interna y externa en contacto:

$$A_{\text{lateral}} = \pi D \cdot e [\text{cm}^2]$$

$$A_{\text{lateral,ext}} = \pi(25.5\text{cm})(1.7\text{cm})$$

$$A_{\text{lateral,ext}} = 136.2 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{lateral,int}} = \pi(16.3\text{cm})(1.7\text{cm})$$

$$A_{\text{lateral,int}} = 87.0 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total,brida}} = A_{\text{lateral,ext}} + A_{\text{lateral,int}} + A_{\text{caras}} = 827.4 \text{ cm}^2$$

- Adaptador (cilindro hueco)

Volumen del adaptador

$$V_{\text{adaptador}} = \frac{\pi}{4} (D_{e,a}^2 - D_{i,a}^2) \cdot h [\text{cm}^3]$$

$$V_{\text{adaptador}} = \frac{\pi}{4} [(17.5\text{cm})^2 - (16.3\text{cm})^2](17\text{cm})$$

$$V_{\text{adaptador}} = 635.5 \text{ cm}^3$$

Área de la corona en contacto:

$$A_{\text{corona}} = \frac{\pi}{4} (D_{e,a}^2 - D_{i,a}^2) [\text{cm}^2]$$

$$A_{\text{corona}} = \frac{\pi}{4} [(17.7\text{cm})^2 - (16.3\text{cm})^2]$$

$$A_{\text{corona}} = 37.4 \text{ cm}^2$$

Área lateral interna y externa en contacto:

$$A_{\text{lateral}} = \pi Dh \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{lateral,ext}} = \pi(17.7\text{cm})(17\text{cm})$$

$$A_{\text{lateral,ext}} = 945.6 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{lateral,int}} = \pi(16.3\text{cm})(17\text{cm})$$

$$A_{\text{lateral,int}} = 870.5 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total,adaptador}} = A_{\text{lateral,ext}} + A_{\text{lateral,int}} + A_{\text{corona}} = 1853.5 \text{ cm}^2$$

- Punto de unión

Volumen de la unión:

$$V_{\text{adaptador}} = \frac{\pi}{4} (D_{e,u}^2 - D_{i,u}^2) \cdot h_u \text{ [cm}^3\text{]}$$

Donde:  $h_u = 1.7 + 1.4 = 3.1\text{cm}$ , modelado como un anillo cilíndrico correspondiente al espesor de la brida con el espesor de la pared del adaptador en la zona de encuentro.

$$V_{\text{adaptador}} = \frac{\pi}{4} [(17.7\text{cm})^2 - (16.3\text{cm})^2](3.4\text{cm}) = 116 \text{ cm}^3$$

Área lateral externa, interna:

$$A_{\text{ext,unión}} = \pi(17.7\text{cm})(3.1\text{cm}) = 172.4\text{cm}^2$$

$$A_{\text{int,unión}} = \pi(16.3\text{cm})(3.1\text{cm}) = 158.7\text{cm}^2$$

Área de caras:

$$A_{\text{caras,unión}} = \frac{\pi}{2} [(17.7\text{cm})^2 - (16.3\text{cm})^2] = 74.8 \text{ cm}^2$$

$$A_{\text{total,adaptador}} = 172.4\text{cm}^2 + 158.7\text{cm}^2 + 74.8 \text{ cm}^2 = 406 \text{ cm}^2$$

- Módulos térmicos

De la ecuación (2.1):

Módulo térmico de la brida:

$$M_{\text{brida}} = \frac{V_{\text{brida}}}{A_{\text{total,brida}}} = \frac{513.5 \text{ cm}^3}{827.4 \text{ cm}^2} = 0.62 \text{ cm}$$

Módulo térmico del adaptador:

$$M_{\text{adaptador}} = \frac{V_{\text{adaptador}}}{A_{\text{total,adaptador}}} = \frac{635.5 \text{ cm}^3}{1853.5 \text{ cm}^2} = 0.34 \text{ cm}$$

Módulo térmico da la unión:

$$M_{\text{unión}} = \frac{V_{\text{unión}}}{A_{\text{total,unión}}} = \frac{116 \text{ cm}^3}{406 \text{ cm}^2} = 0.29 \text{ cm}$$

*Observamos en esta ocasión que la zona crítica no necesariamente es en la unión de la pieza monolítica. El módulo térmico de la brida es de 0.62cm, mientras que el de la unión es de 0.29cm y el del adaptador 0.34cm.*

Como el riesgo está en la brida, la mazarota debe ser colocada directamente sobre la brida, lo más cerca posible de la zona de encuentro, con el adaptador, para que el gradiente térmico “jale” la solidificación hacia la mazarota.

### **Dimensión recomendada**

En moldeo de arena, para que la mazarota solidifique después y alimente el rechupe, se diseña típicamente con:

$$M_{\text{mazarota}} \geq 1.2M_{\text{zona crítica}}$$

$$M_{\text{mazarota}} \geq 1.2(0.62 \text{ cm})$$

$$M_{\text{mazarota}} \geq 0.744 \text{ cm}$$

Para términos de facilidad de corte, se elige una mazarota de dos cilindros y visible: **Cuello** (diámetro menor), para dirigir la solidificación y **cuerpo** (diámetro mayor), para almacenar el aluminio y mantener el calor.

### Módulo de una mazarota cilíndrica visible

Como la mazarota estará expuesta al aire por arriba y rodeada de arena por los lados, el área de enfriamiento relevante del cuerpo se toma como:

$$A_{\text{mazarota}} = A_{\text{Lateral}} + A_{\text{Superior}}$$

$$A_{\text{mazarota}} = \pi DH + \frac{\pi D^2}{4}$$

Y volumen:

$$V_{\text{mazarota}} = \frac{\pi D^2}{4} H$$

El módulo de la mazarota es:

$$M_{\text{mazarota}} = \frac{DH}{4H + D}$$

En moldeo de arena, para mazarota cilíndricas, se considera  $H = 1.2D$  (Campbell, 2015).

$$M_{\text{mazarota}} = \frac{D(1.2D)}{4(1.2D) + D} = 0.2069D$$

Para cumplir  $M_{\text{mazarota}} \geq 0.744 \text{ cm}$ :

$$0.2069D \geq 0.744 \text{ cm}$$

$$D \geq 3.60 \text{ cm}$$

#### Criterio de volumen de mazarota

Dado que la brida tiene un volumen de  $513.5 \text{ cm}^3$ , la contracción volumétrica típica efectiva a alimentar en aluminio se toma alrededor de 6 a 7% (ASM International, 2008).

Donde:

$$V_{\text{contracción}} = 0.066(513.5 \text{ cm}^3) = 34 \text{ cm}^3$$

Como la mazarota no aprovecha el 100% de su volumen debido a que parte se solidifica en antes, cerca de su cuello, se tomará una eficiencia típica aproximadamente de 30% (ASM International, 2008).

$$V_{\text{requerido}} \geq \frac{V_{\text{contracción}}}{\eta}$$

$$V_{\text{requerido}} \geq \frac{34 \text{ cm}^3}{0.30} \geq 113 \text{ cm}^3$$

Para que cumplan ese rango de volumen, tomamos valores de  $H = 5 \text{ cm}$  y  $D = 6 \text{ cm}$ , comprobando con la ecuación (A.9):

$$V_{\text{mazarota}} = \frac{\pi(6\text{cm})^2}{4} (5\text{cm}) = 141.37\text{cm}^3$$

Cumpliendo con  $141.37\text{cm}^3 \geq 113\text{cm}^3$

Entonces, el módulo del cuerpo de la mazarota es:

$$M_{\text{mazarota}} = 1.15 \text{ cm}$$

Haciendo la comparación del obtenido con el requerido:

$$1.15 \text{ cm} > 0.744 \text{ cm}$$

### Diámetro y altura del cuello

El cuello cumple en conectar la mazarota con la brida, permitirá el flujo suficiente y de dimensión correcta para facilitar el corte posterior. Para mazarotas cilíndricas en arena, los ejemplos y tablas usan diámetros de cuello entre 40% y 70% del diámetro del riser (ASM Handbook, 2008).

Entonces, tomando el  $D=6 \text{ cm}$ , a un porcentaje del 60%, obtenemos diámetro  $d=3.6 \text{ cm}$ . La altura dependerá del tamaño de la tapa superior de tierra, pero se estima aproximadamente  $h=3\text{cm}$ .

$$V_{\text{cuello}} = \frac{\pi(3.6\text{cm})^2}{4} (3\text{cm})$$

$$V_{\text{cuello}} = 30.53\text{cm}^3$$

La ubicación de la mazarota es ubicada encima de la zona crítica (brida), con el propósito de su facilidad de corte, mientras que la cavidad o llenadera, se la ubicará en el extremo del adaptador. La llenadera puede mantener un diámetro similar a la al cuello de la mazarota ( $d=3\text{cm}$ ), esto garantiza un flujo del metal sin inconveniente de solidificación durante su llenado, mientras que la altura dependerá de la dimensión de la tapa del molde de tierra, pero aproximadamente puede ser  $h=6 \text{ cm}$ .

### **Comparación costo-beneficio en piezas integradas**

El proceso tradicional en comparación al proceso mejorado, generan costos de manufactura y tiempos de operación como criterio de contraste para determinar ventajas productivas. Este enfoque se basa en costos directos por unidad, mano de

obra involucrada, tiempo de proceso posterior al desmoldeo, eliminación de operaciones no productivas (soldadura, corte de sección con disco de pulidora).

### Identificación de costos directos en procesos convencionales

El precio de venta del acople en la empresa es de USD 40, incluye la mano de obra correspondiente al proceso estándar de fundición. El valor asociado a la soldadura y al corte de sección del adaptador corresponde a un costo adicional, ya que incorpora tanto el material de aporte como la mano de obra especializada requerida únicamente por la fabricación de piezas por separado.

**Tabla A 3**

*Costos adicionales involucrados en el proceso (suelta y corte de sección)*

Concepto	Valor unitario (USD)
Soldadura MIG (incluye mano de obra especializada)	10
Disco de corte	0,5
<b>Costo adicional post-moldeo</b>	<b>10,5</b>

El factor tiempo es un punto importante durante la fabricación de los acoples. Se estimó actualmente un tiempo post-moldeo y taladrado de 17 minutos por pieza terminada, mientras que un proceso monolítico se espera un tiempo no superior a los 10 minutos, dándose así un ahorro de 7 minutos por pieza. Esta reducción se la representa de la siguiente manera:

$$\%Reducción = \frac{t_{actual} - t_{monolítico}}{t_{actual}} \times 100$$

$$\%Reducción = \frac{17 - 10}{17} \times 100 = 41.18\%$$

Por otra parte, la capacidad productiva de piezas por hora se la determina de la siguiente manera:

$$C_{productiva} = \frac{60}{t_{pieza}}$$

Cap<sub>productiva</sub>: capacidad productiva (piezas/hora)

$t_{pieza}$ : tiempo promedio actual o monolítica (min/pieza)

60: minutos contenidos en una hora

Entonces, para el proceso actual y monolítico tenemos:

$$Cap_{productiva,actual} = \frac{60min}{17min/pieza} = 3.53 \text{ piezas/h}$$

$$Cap_{productiva,mono} = \frac{60min}{10min/pieza} = 6 \text{ piezas/h}$$

Dado que un operario especializado que cubre el manejo de la soldadura tipo MIG, herramientas y maquinas como el taladro y la pulidora, su sueldo semanal por 48 horas es de USD 200, su costo por hora es:

$$C_{op,especializado} = \frac{USD 200}{48 h} = 4.166 \text{ USD/h}$$

Y para un operario básico limitado solo al uso de herramientas y pocas maquinas, es de USD100 por el mismo tiempo de trabajo:

$$C_{op,básico} = \frac{USD 100}{48 h} = 2.083 \text{ USD/h}$$

En este caso, el costo de mano de obra por operario para un acople se lo determina:

$$MO = \left( \frac{t_{pieza}}{60} \right) \cdot C_{operario}$$

El costo por mano de obra por un operario especializado para 17 minutos por pieza es:

$$MO = \left( \frac{17}{60} \right) (4.166) = 1.180 \text{ USD/pieza}$$

Y, para un operario básico en un intervalo aproximado de 10 minutos por pieza es:

$$MO = \left( \frac{10}{60} \right) (2.083) = 0.347 \text{ USD/pieza}$$

Por lo tanto, el ahorro por mano de obra es:

$$MO_{ahorro} = 1.180 - 0.347 = 0.833 \text{ USD/pieza}$$

Si esto lo integramos a los costos por operaciones extras (10.50/pieza), tenemos:

$$\text{Costo}_{\text{total}} = 10.50 + 0.833 = 11.333 \text{ USD/pieza}$$

Este impacto contra el precio de venta es de 28.33%, es decir que el proceso monolítico mejora el margen unitario del precio de venta y a su vez, la producción por hora aumentaría un 70%.

## Apéndice B (cálculos y tablas para horno viejo)

**Tabla B 1**

*Registro de datos dimensionales del horno*

Parámetros	valor
• Altura	70 cm
• Diámetro	54 cm
• Espesor del ladrillo	0.8 cm
• Espesor de la lámina metálica	0.3cm

**Tabla B 2**

*Registro de datos dimensionales del crisol*

Parámetros	valor
• Altura	40 cm
• Diámetro	25 cm
• Espesor	0.8 cm
• Peso	40 lb

Cabe recalcar que la actividad del horno no es diaria, dada la información de la empresa, se promedia un uso del horno de 4 días a la semana. En su etapa de operación, se trabaja con un máximo de 220 libras de aluminio reciclado y con un poco más de dos cilindros de gas domésticos al día.

La jornada laboral de la empresa es de 10 horas, pero el horno tiene un aproximado de 8 horas de encendido. Con esta información y con las mediciones del crisol podemos determinar el promedio de aluminio por etapas para derretir todo el metal en las horas correspondientes.

### **Determinación cantidad de carga fija de aluminio a fundir**

Para saber un aproximado del porcentaje de escoria, tomamos la elaboración de un acople de 6 pulgadas (brida y adaptador) después del desmoldeo, es decir, con llenadera y rebabas. Estas tienen un peso de 13.5lb y en base a un dato interno del operador de la empresa, estima aproximadamente 15lb de aluminio(chatarra) para el

llenado de ambas piezas. Por lo que, para un acople, se pierde 1.5lb, lo que equivale un 10% de su masa total. En base a esta información tendríamos:

$$M = 220(1 - 0.1) = 198\text{lb} = 90\text{kg}$$

Que sería una pérdida de 22 libras debido a escoria, entre otros residuos. Se requiere de esta información para determinar la cantidad de aluminio que se derrite por tres etapas durante la jornada de trabajo con base a las dimensiones del crisol, es decir:

$$V_{\text{crisol}} = \pi r^2 h = \pi(0.117)^2(0.40) = 0.0172\text{m}^3$$

Pero la capacidad de aluminio derretido no debería superar o igualar ese volumen, por lo usaremos las  $\frac{3}{4}$  partes de su capacidad

$$V_{\text{crisol } 3/4} = 0.0129\text{m}^3$$

Con ello, determinamos la masa líquida del aluminio con  $\rho_{\text{crisol}} = 2375\text{kg/m}^3$

$$m_{3/4,\text{liq}} = \rho_{\text{crisol}} \cdot V_{\text{crisol } 3/4} = \left(\frac{2375\text{kg}}{\text{m}^3}\right)(0.0129\text{m}^3) = 30.637\text{kg}$$

¿Cuánto chatarra debería cargar para obtener el  $\frac{3}{4}$  del volumen del crisol?

$$m_{\text{carga}} = \frac{m_{3/4,\text{liq}}}{0.90} = \frac{30.637}{0.90} = 34.041\text{kg}$$

Como queremos distribuirlo en tres tandas, sería 33.33kg por tanda, según la carga total. Por lo tanto, no tendríamos inconveniente al cargar, ya que para que funcione a  $\frac{3}{4}$  de la capacidad del crisol se requieren 34.041 kg.

**Tabla B 3***Propiedades empleadas en el análisis térmico del proceso de fundición*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
• Masa de aluminio por colada	$m_{Al}$	33.33	kg
• Temperatura ambiente	$T_0$	20	°C
• Temperatura de vertido	$T_v$	710	°C
• Temperatura de fusión del Al (aprox.)	$T_f$	660	°C
• Calor específico Al sólido (aprox.)	$c_{p,s}$	0.90	kJ/kg·K
• Calor específico Al líquido (aprox.)	$c_{p,l}$	1.18	kJ/kg·K
• Calor latente de fusión del Al	$L_f$	397	kJ/kg
• Crisol acero A36	$m_{crisol}$	18.18	kg
• Calor específico del acero	$C_{pA36}$	0.49	kJ/kg·K
• Densidad del acero	$\rho_{A36}$	7850	kg/m <sup>3</sup>

**Tabla B 4***Datos de operación para una carga de 33.33kg (Al)*

Tipo de chatarra	A360 y Aleaciones 6061
• Tiempo de fusión	93 min
• Temperatura interna	710°C
• Temperatura de lámina metálica	275°C
• Temperatura ambiente	20°C
• Consumo de gas GLP	8.5 kg

**Determinación de calor para elevar la temperatura**

Se considera que la empresa normalmente trabaja con chatarra que contienen desechos de aluminio A360 y aleaciones 6061, se tomará una temperatura aproximada de 600°C. De la ecuación (1.14).

$$q_s = m_{Al} \cdot c_{p,s}(T_f - T_0) \quad [J]$$

Donde:

$$m_{Al} = 33.33\text{kg}$$

$$c_{ps} = 0.90 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$T_f = 600^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

Obtenemos:

$$q_s = (33.33\text{kg}) \cdot (0.90\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(600^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$
$$q_s = 17.39 \text{ MJ}$$

### **Determinación de calor para fusión**

Se calcula el calor latente de usado para transformar de estado sólido a liquido sin varias sin incrementar su temperatura. De la ecuación (1.15):

$$q_L = m_{Al} \cdot L_f \text{ [J]}$$

Donde:

$$m_{Al} = 33.33\text{kg}$$

$$L_f = 397 \text{ KJ/kg}$$

Obtenemos:

$$q_L = (33.33\text{kg})(397 \text{ KJ/kg})$$
$$q_L = 13.23 \text{ MJ}$$

### **Determinación de calor para vertido**

Una vez que el aluminio llega a su cambio de fase se calcula el calor requerido para llegar a la temperatura de vertido. De la ecuación (1.14):

$$q_{liq} = m_{Al} \cdot c_{p,liq}(T_v - T_f) \text{ [J]}$$

Donde:

$$m_{Al} = 33.33\text{kg}$$

$$c_{p,liq} = 1.18 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$T_f = 600^\circ\text{C}$$

$$T_v = 710^\circ\text{C}$$

Obtenemos:

$$q_{liq} = (33.33\text{kg}) \left( 1.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{K} \right) (710^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C})$$

$$q_{liq} = 4.32\text{MJ}$$

### **Determinación de la energía total de la fusión**

La energía total requerida para lograr la fusión en la tanda de 33.33kg se calcula mediante la sumatoria de todos los calores aportados al metal. De la ecuación (1.16):

$$q_{\text{útil},\text{fusión}} = q_s + q_L + q_v \text{ [J]}$$

Obtenemos:

$$q_{\text{útil},\text{fusión}} = 17.39 \text{ MJ} + 13.23 \text{ MJ} + 4.32\text{MJ}$$

$$q_{\text{útil},\text{fusión}} = 34.94 \text{ MJ}$$

### **Determinación del calor sobre el crisol**

La energía absorbida por el crisol durante el proceso de calentamiento y fusión del aluminio se obtiene de la ecuación (1.14):

$$q_{\text{crisol}} = m_{\text{crisol}} \cdot c_{p,A36} (T_f - T_0) \text{ [J]}$$

Donde:

$$m_{\text{crisol}} = 40\text{lb} = 18.18\text{kg}$$

$$c_{p,A36} = 0.49 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K}$$

$$T_f = 710^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

Obtenemos:

$$q_{\text{crisol}} = (18.18\text{kg})(0.49\text{kJ}/\text{kg} \cdot \text{K})(710^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \text{ [J]}$$

$$q_{\text{crisol}} = 6.14 \text{ MJ}$$

### **Determinación de la energía total de la fundición**

Calculamos la energía total para la fundición, sumando el calor brindado al aluminio y al crisol. De la ecuación (1.17):

$$q_{\text{útil,fundición}} = q_{\text{útil,fusión}} + q_{\text{crisol}} \text{ [J]}$$

Obtenemos:

$$q_{\text{útil,fundición}} = 34.94 \text{ MJ} + 6.14 \text{ MJ}$$

$$q_{\text{útil,fundición}} = 41.08 \text{ MJ}$$

Para un tiempo de fusión de 93 minutos, el calor útil de fundición es:

$$Q_{\text{útil,fundición}} = \frac{41.08 \text{ MJ}}{5580\text{s}}$$

$$Q_{\text{útil,fundición}} = 7.36 \text{ kW}$$

### **Determinación de peso total y calor requerido por unidad de masa para el aluminio y el crisol en conjunto**

- *masa total (aluminio y crisol)*

De la ecuación (2.1):

$$\text{masa}_{\text{total}} = m_{\text{Al}} + m_{\text{crisol}} \text{ [kg]}$$

Obtenemos:

$$\text{masa}_{\text{total}} = 33.33\text{kg} + 18.18\text{kg}$$

$$\text{masa}_{\text{total}} = 51.51 \text{ kg}$$

Una vez que se obtuvo el calor requerido de fundición y el peso total entre el aluminio con el crisol, determinamos el calor requerido que permitirá analizar el consumo de calor por kilogramo. De la ecuación (2.2):

$$q_{kg} = \frac{Q_{\text{útil, fundición}}}{\text{masa}_{\text{total}}} \text{ [J/kg]}$$

Obtenemos:

$$q_{kg} = \frac{41.08 \text{ MJ}}{51.51 \text{ kg}}$$

$$q_{kg} = 797.51 \text{ kJ/kg}$$

### **Determinación de la capacidad de calentamiento**

- *Área total interna (cámara)*

#### Área de la base

Considerando el radio del horno:

$$r_b = (12.5 + 6) \text{ cm} = 18.5 \text{ cm} = 0.185 \text{ m}$$

De la ecuación:

$$A_{\text{base}} = \pi r_b^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

Obtenemos:

$$A_{\text{base}} = \pi (0.185 \text{ m})^2$$

$$A_{\text{base}} = 0.107 \text{ m}^2$$

#### Área interna del cuerpo

De la ecuación:

$$A_{\text{cuerpo, int}} = 2\pi r_i \cdot H \text{ [m}^2\text{]}$$

Donde:

$$r_i = (12.5 + 6) \text{ cm} = 18.5 \text{ cm} = 0.185 \text{ m}$$

$$H = (70 - 8) \text{ cm} = 62 \text{ cm} = 0.62 \text{ m}$$

Obtenemos:

$$A_{\text{cuerpo, int}} = 2\pi (0.185 \text{ m})(0.62 \text{ m})$$

$$A_{\text{cuerp, int}} = 0.7206 \text{ m}^2$$

### Área del crisol

El cálculo de su área es relacionado al de un cilindro hueco.

De la ecuación (2.25):

$$A_{\text{crisol}} = 2\pi r \cdot h + \pi r^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

Donde:

$$r_{\text{cri}} = 12.5\text{cm} = 0.125\text{m}$$

$$h = 40\text{cm} = 0.4\text{m}$$

obtenemos:

$$A_{\text{crisol}} = 2\pi(0.125\text{m})(0.4\text{m}) + \pi(0.125)^2$$
$$A_{\text{crisol}} = 0.363 \text{ m}^2$$

### Área total de la cámara de combustión

Obtenemos el área total de la cámara con la ecuación (2.26):

$$A_{\text{cámara}} = A_{\text{base}} + A_{\text{cuerpo,int}} + A_{\text{crisol}} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{cámara}} = 0.107 \text{ m}^2 + 0.7206 \text{ m}^2 + 0.363 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{cámara}} = 1.1906 \text{ m}^2$$

Calculamos la capacidad de calentamiento. De la ecuación (2.27):

$$\text{Cap}_{\text{calentamiento}} = \frac{\text{Peso}_{\text{total}}}{t \cdot A_{\text{cámara}}} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Obtenemos:

$$\text{Cap}_{\text{calentamiento}} = \frac{51.51 \text{ kg}}{(1.55\text{h})(1.1906 \text{ m}^2)}$$

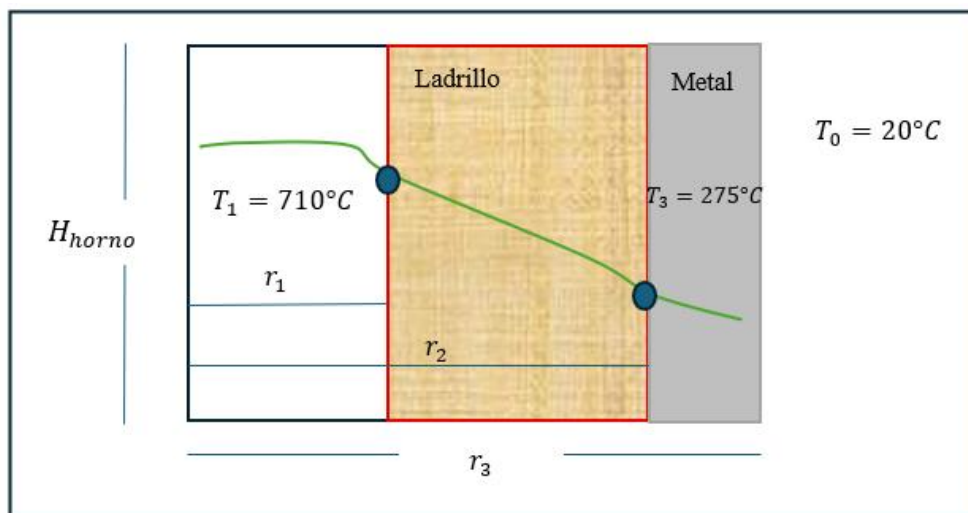
$$\text{Cap}_{\text{calentamiento}} = 27.918 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$$

## Análisis de pérdidas de calor en las paredes y al ambiente usando analogía de resistencias eléctricas

Las paredes del horno están únicamente formadas por una capa de ladrillo refractario y la lámina metálica, de manera paralela, la base del horno está compuesta por las mismas capas.

**Figura B 1**

*Esquema de la mitad del horno formado por la capa refractaria y la lámina metálica*

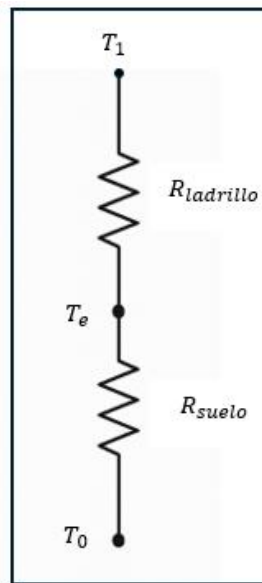


## Análisis de pérdida de calor en la parte inferior

El espesor de la base es el mismo espesor del ladrillo refractario, en este caso no se considera la lámina metálica como una capa, debido a su deterioro por los años en contacto a la humedad del suelo. Dado que no se tiene la ficha técnica del material ni de ensayos para determinar la conductividad térmica del ladrillo, se consideró el deterioro visual del ladrillo y la información de la empresa que el horno fue construido hace aproximadamente 18 años con ladrillo refractario adquirido en el mercado ecuatoriano. Dado esto, se lo clasifica como ladrillo refractario denso de arcilla con conductividad térmica de aproximadamente  $1.4 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , siendo este un valor respaldado para ladrillos densos de arcilla bajo un rango de deterioro (LZ Refractory,s.f.).

**Figura B 2**

*Esquema de resistencias térmicas para la base del horno*



- *Resistencia térmica de la base del horno*

De la ecuación (1.5):

$$R_{base} = \frac{e_{base}}{k_{ladrillo} \cdot A_{base}} \text{ [K/W]}$$

Donde:

$$k_{ladrillo} = 1.4 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$e_{base} = 0.08 \text{ m}$$

$$A_{base} = 0.229 \text{ m}^2$$

Obtenemos:

$$R_{base} = \frac{0.08\text{m}}{(1.4\text{W/mK})(0.229\text{m}^2)} = 0.249\text{K/W}$$

- *Resistencia térmica en una profundidad de suelo*

Parte del calor se sigue difundiendo por el terreno, lo cual es recomendable determinar ese valor de pérdida para un análisis de diseño y desempeño. Debido a que el suelo se comporta más como un medio semi-infinito, resulta más apropiado emplear una resistencia térmica por forma, la cual considera la propagación radial del calor desde una superficie circular en contacto con el suelo. (Incropera et al, 2011).

Para un suelo promedio en la costa ecuatoriana, se considera una conductividad térmica de  $0.8 \text{ W/m}\cdot\text{K}$ , según estudios realizados en Ecuador (Mendoza, 2018). De la ecuación (1.7):

$$R_{\text{suelo}} = \frac{1}{4k_{\text{suelo}} \cdot a} \text{ [K/W]}$$

Donde:

$$k_{\text{suelo}} = 0.8 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$a = \sqrt{\frac{A_{\text{base}}}{\pi}} = \sqrt{\frac{0.229\text{m}^2}{\pi}} 0.270\text{m}$$

Obtenemos:

$$R_{\text{suelo}} = \frac{1}{4(0.8\text{W/mK})(0.270\text{m}^2)} = 1.16 \text{ K/W}$$

- *Pérdida total de calor en la parte inferior del horno*

Calculamos la pérdida de calor de la base sumando el calor de conducción en la capa de ladrillo y del suelo. De la ecuación (1.7):

$$Q_{\text{inferior}} = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{base}} + R_{\text{suelo}}} \text{ [W]}$$

Donde:

$$T_2 = 710^\circ\text{C}$$

$$T_0 = 20^\circ\text{C}$$

Obtenemos:

$$Q_{\text{inferior}} = \frac{710^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{0.249\text{K/W} + 1.16 \text{ K/W}}$$

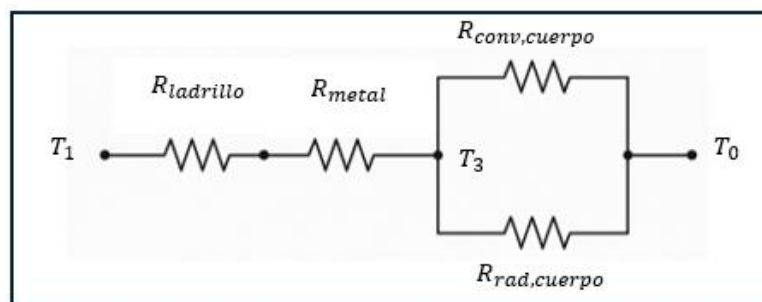
$$Q_{\text{inferior}} = 0.49\text{kW}$$

### Análisis de pérdida de calor en el cuerpo

La pérdida de calor se disipa a través de las paredes del horno en forma de conducción y luego se evacúa al ambiente de manera paralela mediante convección y radiación.

**Figura B 3**

*Esquema de resistencias térmicas para la base del horno*



- *Resistencia por medio de conducción de las paredes del cuerpo*

El esquema representa dos capas de conductividad (refractario y metal), debido a que son las únicas existentes en el horno actual

Se obtienen los radios a partir de la Figura B, donde se obtiene:

$$r_1 = (28.5 - 8 - 0.3)\text{cm} = 20.2\text{cm} = 0.202\text{m}$$

$$r_2 = (28.5 - 0.3)\text{cm} = 28.2\text{cm} = 0.282\text{m}$$

$$r_3 = 28.5\text{cm} = 0.285\text{m}$$

De la ecuación (2.7):

$$R_{\text{cond}} = \frac{\ln(r_0/r_i)}{2\pi Lk_i} \text{ [}^\circ\text{C/W]}$$

Donde:

$$T_1 = 710^\circ\text{C}$$

$$T_3 = 143^\circ\text{C}$$

$$k_{\text{ladrillo}} = 1.4 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$k_{\text{metal}} = 50 \frac{\text{W}}{\text{mK}}$$

$$L = 0.62\text{m}$$

$$r_1 = 0.185\text{m}$$

$$r_2 = 0.265\text{m}$$

$$r_3 = 0.268\text{m}$$

Obtenemos:

$$R_{\text{cond}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi Lk_{\text{ladrillo}}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi Lk_{\text{metal}}}$$

$$R_{\text{cond}} = 0.06589 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 5.78 \times 10^{-5} \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

$$R_{\text{cond}} = 0.06595 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

- *Cálculo de coeficiente de convección/radiación del cuerpo y pérdida de calor*  
Calculamos el coeficiente de expansión térmica, considerando la temperatura de película. De la ecuación (2.9):

$$T_{\text{película,cuorp}} = \frac{T_{\text{ambiente}} + T_3}{2} \text{ [K]}$$

Donde:

$$T_{\text{ambiente,cuorp}} = (20 + 273)\text{K} = 293\text{K}$$

$$T_3 = (275 + 273)\text{K} = 548 \text{ K}$$

Obtenemos:

$$T_{\text{película,cuorp}} = \frac{293\text{K} + 548\text{K}}{2}$$

$$T_{\text{película,cuorp}} = 420.5 \text{ K}$$

Dada la ecuación:

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{película,cuorp}}} \text{ [1/K]}$$

Obtenemos:

$$\beta = \frac{1}{420.5 \text{ K}}$$

$$\beta = 2.377 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con el resultado de la temperatura de película ( $T_{\text{película,cuorp}} = 147.5^{\circ}\text{C}$ ), nos dirigimos a la Tabla B y mediante interpolación determinamos las propiedades del aire a 1 atm.

## Tabla B 5

Propiedades del aire a la presión de 1 atm (Çengel & Ghajar, 2020)

TABLA A-15							
Propiedades del aire a la presión de 1 atm							
Temp., $T, ^{\circ}\text{C}$	Densidad, $\rho, \text{kg/m}^3$	Calor específico, $c_p, \text{J/kg} \cdot \text{K}$	Conductividad térmica, $k, \text{W/m} \cdot \text{K}$	Difusividad térmica, $\alpha, \text{m}^2/\text{s}^2$	Viscosidad dinámica, $\mu, \text{kg/m} \cdot \text{s}$	Viscosidad cinemática, $\nu, \text{m}^2/\text{s}$	Número de Prandtl, Pr
-150	2.866	983	0.01171	$4.158 \times 10^{-6}$	$8.636 \times 10^{-6}$	$3.013 \times 10^{-6}$	0.7246
-100	2.038	966	0.01582	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-6}$	$5.837 \times 10^{-6}$	0.7263
-50	1.582	999	0.01979	$1.252 \times 10^{-5}$	$1.474 \times 10^{-5}$	$9.319 \times 10^{-6}$	0.7440
-40	1.514	1 002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1 004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1 005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1 006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1 006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1 006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1 006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1 007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1 007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1 007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1 007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1 007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1 007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1 007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1 007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1 007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1 007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1 008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1 008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1 009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1 011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1 013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1 016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1 019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1 023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1 033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1 044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1 056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1 069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1 081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1 093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1 115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1 135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1 153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1 169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1 184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1 234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1 264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

**Tabla B 6**

*Resultados de las propiedades del aire a una temperatura de película de 147.5°C generada en el cuerpo del horno*

<b>k</b> (W/mK)	<b>v</b> [x10 <sup>-5</sup> ] (m <sup>2</sup> /s)	<b>α</b> [x10 <sup>-5</sup> ] (m <sup>2</sup> /s)	<b>β</b> [x10 <sup>-3</sup> ] (m <sup>2</sup> /s)	<b>Pr<sub>cuerp</sub></b>
0.03425	2.831	4.021	2.377	0.703

Con la información de la Tabla B 6, calculamos el número de Rayleigh. De la ecuación (1.9):

$$Ra_{\text{cuerp}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

Obtenemos:

$$Ra_{\text{cuerp}} = \frac{\left(\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(2.377 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}\right) (275^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) (0.62\text{m})^3}{\left(\frac{2.831 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right) \left(\frac{4.021 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right)}$$

$$Ra_{\text{cuerp}} = 1.24 \times 10^9$$

Con el valor de  $Ra_{\text{cuerp}} = 1.24 \times 10^9$ , se puede considerar un flujo de transición inicio a turbulento y de  $Pr_{\text{cuerp}} = 0.703$ , determinamos el número de Nusselt. De la ecuación (1.10):

$$Nu_{\text{ccuerp}} = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_{\text{cuerp}}^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr_{\text{cuerp}}}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2 ; Ra \geq 10^9; \text{turbulento}$$

Obtenemos:

$$\text{Nu}_{\text{cuerp}} = \left[ 0.825 + \frac{0.387(1.24 \times 10^9)^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{0.703}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2$$

$$\text{Nu}_{\text{cuerp}} = 131.3$$

Del valor de  $\text{Nu}_c$ , calculamos el coeficiente de convección para el cuerpo del horno. De la ecuación (2.12):

$$h_{\text{conv,cuerp}} = \frac{\text{Nu}_{\text{cuerp}} \cdot k}{L_{\text{cuerp}}} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Obtenemos:

$$h_{\text{conv,cuerp}} = \frac{(131.3) \left(\frac{0.03425 \text{ W}}{\text{mK}}\right)}{0.62 \text{ m}}$$

$$h_{\text{conv,cuerp}} = 7.25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

Para el valor del factor de emisividad  $\epsilon$ , se tomará un valor 0.8, valor estimado para una combinación de acero oxidado y ladrillo refractario en un rango de 0.75 y 0.90 (Holman, J.P, 2010).

De las ecuaciones (2.14) (2.15) obtenemos:

$$h_{\text{rad,cuep}} = \epsilon \sigma (T_3 + T_\infty)(T_3^2 + T_\infty^2) \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

$$h_{\text{rad,cuerp}} = (0.8)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(548 \text{ K} + 293 \text{ K})[(548 \text{ K})^2 + (293 \text{ K})^2]$$

$$h_{\text{rad,cuerp}} = 14.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

La resistencia en la parte externa del cuerpo viene dada de la ecuación

(1.7):

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{(h_{\text{rad,cuep}} + h_{\text{rad,cuero}}) \cdot A_{\text{cuerpo}}}$$
$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{(7.25 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} + 14.73 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}) \cdot (1.052)} = 0.04324 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

Por lo tanto, el calor perdido en el cuerpo del horno es:

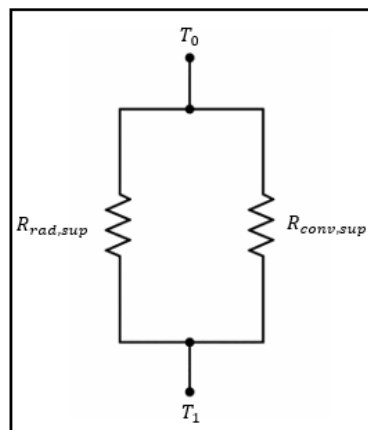
$$Q_{\text{ccuerpo}} = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{cond}} + R_{\text{ext}}}$$
$$Q_{\text{cuerpo}} = \frac{690\text{K}}{0.06595 \frac{\text{K}}{\text{W}} + 0.04324 \frac{\text{K}}{\text{W}}} = 6.32 \text{ kW}$$

### Análisis de pérdida de calor en la parte superior

La parte superior del horno se modela como dos resistencias térmicas en paralelo, correspondientes a los procesos de convección natural y radiación térmica hacia el ambiente.

**Figura B 4**

*Esquema de resistencias térmicas para la parte superior del horno*



- *Cálculo de coeficiente de convección/radiación superior y pérdida de calor*

Se considera la temperatura de la superficie de 650°C, variando las propiedades del aire.

Con la misma ecuación (2.8):

$$T_{\text{película,sup}} = \frac{T_{\text{ambiente}} + T_3}{2} \text{ [K]}$$

Donde:

$$T_{\text{ambiente}} = (20 + 273)\text{K} = 293\text{K}$$

$$T_{\text{sup}} = (650 + 273)\text{K} = 923\text{K}$$

Obtenemos:

$$T_{\text{película,sup}} = \frac{293\text{K} + 923\text{K}}{2}$$

$$T_{\text{película,sup}} = 608 \text{ K}$$

Dada la ecuación (2.9):

$$\beta = \frac{1}{T_{\text{película,sup}}} \text{ [1/K]}$$

Obtenemos:

$$\beta = \frac{1}{608 \text{ K}}$$

$$\beta = 1.64 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con el resultado de la temperatura de película ( $T_{\text{película}} = 335^\circ\text{C}$ ), nos dirigimos a la Tabla B 5 y mediante interpolación determinamos las propiedades del aire a 1 atm, Tabla B 7.

### Tabla B 7

*Resultados de las propiedades del aire a una temperatura de película de 335.5°C generada en el cuerpo del horno*

<b>k</b> (W/mK)	<b>v</b> [x10 <sup>-5</sup> ] (m <sup>2</sup> /s)	<b>α</b> [x10 <sup>-5</sup> ] (m <sup>2</sup> /s)	<b>β</b> [x10 <sup>-3</sup> ] (m <sup>2</sup> /s)	<b>Pr<sub>cuerp</sub></b>
0.0495	5.24	7.90	1.645	0.66

Con la información de la Tabla B 7, calculamos el número de Rayleigh. De la ecuación (2.9):

$$Ra_{sup} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

Primero determinamos el valor de  $L_{sup}$  por la razón del área superior del horno.

De la ecuación:

$$L_{sup} = \frac{A_{sup}}{P_{sup}} [m]$$

$$L_{sup} = \frac{0.54 \text{ m}}{4}$$

$$L_{sup} = 0.135 \text{ m}$$

Obtenemos:

$$Ra_{sup} = \frac{\left(\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(1.645 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}\right) (650^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})(0.135\text{m})^3}{\left(\frac{5.24 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right) \left(\frac{7.90 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right)}$$

$$Ra_{sup} = 6.04 \times 10^6$$

El número de Nusselt se obtiene simulando la parte superior sin tapa como una placa horizontal.

Con el valor de  $Ra_{sup} = 6.04 \times 10^6$  y de  $Pr_{sup} = 0.66$ , determinamos el número de Nusselt. De la ecuación (2.11):

Obtenemos:

$$Nu_{sup} = 0.54 Ra^{1/4}; 10^4 \leq Ra_{sup} \leq 10^7; \text{laminar}$$

$$Nu_{sup} = 0.54(6.04 \times 10^6)^{1/4}$$

$$Nu_{sup} = 26.77$$

Para el respectivo cálculo del coeficiente de convección en la parte superior del horno. De la ecuación (2.12):

$$h_{conv,sup} = \frac{Nu_{sup} \cdot k}{L_{sup}} [W/m^2 \cdot K]$$

Obtenemos:

$$h_{\text{conv,sup}} = \frac{(26.77) \left( \frac{0.0495\text{W}}{\text{mK}} \right)}{0.135\text{m}}$$

$$h_{\text{conv,sup}} = 9.82 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación. De la ecuación (2.33):

$$h_{\text{rad,sup}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{sup}} + T_{\infty})(T_{\text{sup}}^2 + T_{\infty}^2) [\text{W/m}^2 \cdot \text{K}]$$

Para el valor del factor de emisividad  $\varepsilon$ , se tomará un valor 0.95, valor estimado para una abertura que “ve” un interior refractario/llama, este valor suele estar cerca de 1 (Holman, J.P, 2010).

Obtenemos:

$$h_{\text{rad,sup}} = (0.95)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(923\text{K} + 293\text{K})[(923\text{K})^2 + (293\text{K})^2]$$

$$h_{\text{rad,sup}} = 61.42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

La pérdida de calor superior de manera simultánea se determina de la ecuación (2.3):

$$Q_{\text{superior}} = (h_{\text{conv,sup}} + h_{\text{rad,sup}})A_{\text{sup}}(T_{\text{sup}} - T_0) [\text{W}]$$

Obtenemos:

$$Q_{\text{superior}} = (9.82 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} + 61.42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(0.229\text{m}^2)(923\text{K} - 293\text{K})$$

$$Q_{\text{superior}} = 10.27 \text{ kW}$$

- *Pérdida de calor por gas*

Para un horno sin tapa, se considera un exceso de aire de aproximadamente 30%, dando un equivalente de  $\lambda = 1.3$ , dentro del rango comúnmente reportado para equipo térmicos (Purdue University, 2024).

Este combustible es una mezcla de 60% butano y 40% propano (Empresa Pública Petroecuador, 2024).

La relación estequiométrica de aire combustible (RAC) tiene un valor alrededor de 15.6 de aire por cada kg de combustible (Heywood, J.B, 1988) De las ecuaciones (2.14), (2.38), (2.39):

$$m_{\text{gases}} = (1.3)(15.6)(8.5\text{kg}) + 8.5\text{kg}$$

$$m_{\text{gases}} = 180.7 \text{ kg}$$

$$q_{\text{gases}} = (180.7\text{kg})(1.14\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(650^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) = 129.8\text{MJ}$$

Obtenemos:

$$Q_{\text{gases}} = \frac{129.8\text{MJ}}{5580 \text{ s}} = 23.26 \text{ kW}$$

### **Pérdida total de calor en el horno**

Para el cálculo total del calor en el horno, sumaremos las pérdidas de calor generado por las paredes y la parte superior del horno. De la ecuación (2.19):

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{cuerpo}} + Q_{\text{inferior}} + Q_{\text{superior}} + Q_{\text{gases}} [\text{W}]$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 6.32\text{kW} + 0.49\text{kW} + 10.27\text{kW} + 23.26\text{kW} = 40.34 \text{ kW}$$

### **Determinación de la energía de entregada por el combustible**

Se considera el poder calorífico inferior de 45605.6kJ/kg debido a que, en el horno actual, los gases de combustión salen sin condensación significativa del valor de agua. Tiene muchas fugas, ineficiencias del aislamiento, etc. De la ecuación (2.9)

Obtenemos:

$$Q_{\text{combustible}} = \frac{\left(\frac{45605.6\text{kJ}}{\text{kg}}\right)(8.5\text{kg})}{5580} = 69.47\text{kW}$$

### **Determinación del calor total por medio de balance energético**

Mediante la ley de conservación de la energía, ecuación (2.20):

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{pérdidas}} + Q_{\text{útil, fundición}} [\text{W}]$$

$$Q_{\text{Total}} = 40.34\text{W} + 7.36\text{kW}$$

Obtenemos:

$$Q_{\text{Total}} = 47.7 \text{ kW}$$

### Determinación de la eficiencia del horno

De la ecuación (2.20):

$$\eta_{\text{real}} = \frac{Q_{\text{útil, fundición}}}{Q_{\text{combustible}}}$$

Obtenemos:

$$\eta_{\text{real}} = \frac{7.36 \text{ kW}}{69.47 \text{ kW}} = 0.11$$

$$\eta_{\text{real}} = 11\%$$

Para obtener la eficiencia “teórica”, usamos la relación de calor útil para el metal y el calor total del sistema:

$$\eta_{\text{teórica}} = \frac{Q_{\text{útil, fundición}}}{Q_{\text{Total}}}$$

Obteniendo:

$$\eta_{\text{teórica}} = \frac{7.36 \text{ kW}}{47.7 \text{ kW}} = 0.15$$

$$\eta_{\text{teórica}} = 15\%$$

## Apéndice C (cálculos y tablas para selección de crisol)

Según la carga de aluminio que usa la empresa como punto máximo en un día laboral, tomamos en consideración las mismas medidas actuales para el tamaño del crisol.

A continuación, se presenta el análisis comparativo entre el crisol de acero A36 y de grafito-arcilloso (SiC-grafito).

**Tabla C 1**

*Propiedades empleadas en el análisis comparativo de crisoles*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
• Crisol A36 (40 lb)	$m_{\text{crisol}}$	18.14	kg
• Calor específico del acero	$c_{p,A36}$	0.49	kJ/kg·K
• Densidad del acero	$\rho_{A36}$	7850	kg/m <sup>3</sup>
• Densidad del grafito	$\rho_{\text{grafito}}$	1750	kg/m <sup>3</sup>
• Calor específico del grafito	$c_{p,\text{grafito}}$	0.71	kJ/kg·K
• Coladas por día	N	3	coladas/día
• Masa de cilindro	$m_{\text{cilindro}}$	15	kg
• Precio cilindro GLP	$\text{Precio}_{\text{GLP}}$	2.50	USD

### CÁLCULO PRELIMINAR DE ENERGÍAS PARA LLEVAR EL ALUMINIO DE 25°C A 710°C

#### Determinación de calor para elevar la temperatura

De la ecuación (1.14).

$$q_s = m_{\text{Al}} \cdot c_{p,s}(T_f - T_0) \text{ [J]}$$

Obtenemos:

$$q_s = (33.33\text{kg}) \cdot (0.90\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(600^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})$$

$$q_s = 17.39 \text{ MJ}$$

### **Determinación de calor para fusión**

De la ecuación (1.15):

$$q_L = m_{Al} \cdot L_f \text{ [J]}$$

Obtenemos:

$$q_L = (33.33\text{kg})(397 \text{ KJ/kg})$$
$$q_L = 13.23 \text{ MJ}$$

### **Determinación de calor para vertido**

De la ecuación (1.14):

$$q_{liq} = m_{Al} \cdot c_{p,liq}(T_v - T_f) \text{ [J]}$$

Obtenemos:

$$q_{liq} = (33.33\text{kg}) \left( 1.18 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}} \cdot \text{K} \right) (710^\circ\text{C} - 600^\circ\text{C})$$
$$q_{liq} = 4.32\text{MJ}$$

### **Determinación del calor sobre el crisol A36**

De la ecuación (1.14):

$$q_{crisol,A36} = m_{A36} \cdot c_{p,A36}(T_f - T_0) \text{ [J]}$$

Donde:

Obtenemos:

$$q_{crisol,A36} = (18.18\text{kg})(0.49\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(710^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \text{ [J]}$$
$$q_{crisol,A36} = 6.14 \text{ MJ}$$

### **Determinación del calor sobre el crisol grafito-arcilloso**

De la ecuación (1.14):

$$q_{\text{crisol,grafito}} = m_{\text{grafito}} \cdot c_{p,\text{grafito}}(T_f - T_0) \text{ [J]}$$

Donde:

$$m_{\text{grafito}} = m_{A36} \cdot \frac{\rho_{\text{grafito}}}{\rho_{A36}} \text{ [kg]} \quad (\text{C. 1})$$

Asumiendo misma geometría, mismo volumen, se escala por densidad.

$$m_{\text{grafito}} = (18.18\text{kg}) \cdot \left( \frac{1750\text{kg/m}^3}{7850\text{kg/m}^3} \right) = 4.05\text{kg}$$

Obtenemos:

$$q_{\text{crisol,grafito}} = (4.05\text{kg})(0.71\text{kJ/kg} \cdot \text{K})(710^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \text{ [J]}$$

$$q_{\text{crisol,grafito}} = 1.98 \text{ MJ}$$

### **Energía útil de fundición para crisol A36**

De la ecuación (1.17):

Obtenemos:

$$q_{\text{útil,A36}} = 34.94 \text{ MJ} + 6.14 \text{ MJ}$$

$$q_{\text{útil,A36}} = 41.08 \text{ MJ}$$

### **Energía útil de fundición para crisol grafito-arcilla**

De la ecuación (1.7).

Obtenemos:

$$q_{\text{útil,grafito}} = 34.94 \text{ MJ} + 1.98 \text{ MJ}$$

$$q_{\text{útil,grafito}} = 36.92 \text{ MJ}$$

### Ahorro de energía útil por cambio de crisol

Esta energía útil sería la diferencia entre ambos crisoles, la que se dejaría de gastar en cada colada al no tener que calentar un crisol de acero y usar uno más liviano (grafito).

$$\Delta q = q_{\text{útil,A36}} - q_{\text{útil,grafito}} \quad [J]$$

$$\Delta q = 41.08 \text{ MJ} - 36.92 \text{ MJ} = 4.16 \text{ MJ}$$

### Equivalencia energética del ahorro de combustible GLP

Cabe recalcar que las mejoras del horno incorporan aislamiento multicapa y una tapa que limita las pérdidas de convección, radiación y fugas de gases calientes, por lo que, se estima una eficiencia global hipotética de entre 20% a 40%, rango típico reportado para hornos de crisol a gas (ASM International, 2008). El valor que se considerará de eficiencia será de aproximadamente 30%.

De la ecuación (2.20):

$$m_{\text{GLP,ahorro}} = \frac{4.16 \text{ MJ}}{(0.30)(45605.6 \text{ kJ/kg})}$$

$$m_{\text{GLP,ahorro}} = 0.304 \text{ kg}$$

- Ahorro económico de GLP por colada

Dado que el valor promedio del cilindro domestico en Ecuador es de USD2.50 con una masa de 15kg de contenido, el precio por kilogramos es:

$$\text{Precio}_{\text{GLP}} = \frac{2.50 \text{ USD}}{15 \text{ kg}} = 0.1667 \text{ USD/kg}$$

$$\text{Costo}_{\text{GLP,ahorro}}^{\text{colada}} = m_{\text{GLP,ahorro}} \cdot \text{Precio}_{\text{GLP}} [\text{USD/colada}]$$

Obtenemos:

$$\text{Costo}_{\text{GLP,ahorro}}^{\text{colada}} = 0.0507 \text{ USD/colada}$$

- Ahorro económico de GLP por semana

Se requiere hacer 3 tandas durante el día, y para un promedio de 4 días por semana, tendremos 12 colados en una semana:

$$\text{Costo}_{\text{GLP,ahorro}}^{\text{semana}} = (0.0507 \text{ USD})(12) = 0.61 \text{ USD/semana}$$

### **Costo de reparación de crisol A36**

Se mencionó que la ventaja de usar crisol de acero A36 es que se puede reparar en la propia empresa, figura B. Esta reparación suele darse de manera periódica cada 2 semanas, se reemplaza la base por una nueva, siendo un costo de aproximadamente USD 35.

$$\text{Costo}_{\text{semanal}}^{\text{reparación}} = 17.5 \text{ USD/semana}$$

### **Costo anual usando crisol de acero A35**

Se estimó un gasto anual aproximado sumando el mantenimiento y consumo de GLP generado al mantenerse con la alternativa del crisol de acero A36 y considerando que al año se usan 5 unidades.

$$\text{Costo}_{\text{crisol}} = 80 \text{ USD}$$

$$\text{Costo}_{\text{crisol/anual}} = 400 \text{ USD}$$

$$\text{Costo}_{\text{mant/semanal}} = 18.11 \text{ USD/semana}$$

$$\text{Costo}_{\text{mat/anual}} = 941,72 \text{ USD/anual}$$

$$\text{Costo}_{\text{total/anual}} = 1341.72 \text{ USD/anual}$$

### **Recuperación económica al reemplazar un crisol grafito-arcilla**

Para un crisol de grafito-arcilla industrial, se estima un costo aproximado de \$900, lo cual se fundamenta en listados comerciales de proveedores internacionales de refractarios, donde se reportan precios unitarios cercanos a este valor (Zhucheng Jinde Refractory, 2024).

$$\text{Tiempo}_{\text{recuperación}} = \frac{900 \text{ USD}}{1341.72 \text{ USD/semana}}$$

$$\text{Tiempo}_{\text{recuperación}} = 8 \text{ meses}$$

## Apéndice D (descripciones de materiales y cálculos de dimensiones de horno)

Como se había anticipado en el capítulo 2, la tabla 2.14 refleja que el revestimiento interno puede darse por concreto o ladrillo refractario de alta o media alúmina tolerante a un rango de temperatura de trabajo de 720°C. El aislamiento de respaldo será una manta de fibra cerámica con densidad aproximada de 128 kg/m<sup>3</sup> con una temperatura máxima de 1260°C. La lámina metálica se considera de las mismas características usada en el horno actual (espesor de 3 mm), ya que ha demostrado mucha versatilidad y durabilidad en más de 18 años de trabajo.

### Concreto refractario

**Tabla D 1**

*Propiedades de concreto (concreto refractario)*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
• Calor específico	$C_{p,concreto}$	1.06	kJ/kg·K
• Densidad	$\rho_{concreto}$	2050	kg/m <sup>3</sup>
• Conductividad térmica	$k_{concreto}$	1.7	W/m·K

**Figura D 1**

*Concreto refractario de alúmina Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (TIVAL, Ecuador)*



## Figura D 2

Ficha técnica de concreto refractario concrax 1300°C (ERECOS, Colombia)

Versión: 02
Aprobó: Fabio Vargas - Ing I+D
Fecha de vigencia: 04/09/2025

**ERECOS**

## CONCRAX 1300

### Propiedades

Clasificación NTC-814, ASTM C-401	Clase B	
Composición química (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	41.7
	SiO <sub>2</sub>	42.8
	TiO <sub>2</sub>	1.7
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	4.2
	CaO	7.0
	MgO	0.3
	Álcalis	0.8
Cono pirométrico equivalente	14	
Temperatura equivalente (°C) NTC - 706, ASTM C - 24	1398	
Máxima temperatura de servicio (°C)	1300	
Máximo tamaño del grano (mm)	10	
Material seco requerido m <sup>3</sup>	2000 - 2150 kg	
Agua de preparación NTC - 988, ASTM C - 860 (cm <sup>3</sup> de agua/kg de material seco)	130-140	
Densidad volumétrica (g/cm <sup>3</sup> ) ASTM C - 134	110 °C	2.05-2.20
	1000 °C	2.00-2.10
	1260 °C	2.00-2.10
Módulo de ruptura en frío (MPa) NTC - 988, ASTM C - 133	110 °C	5.0-8.0
	1000 °C	2.0-5.0
	1260 °C	5.0-8.0
Resistencia a la compresión en frío (MPa) NTC - 988, ASTM C-133	110 °C	25.0-50.0
	1000 °C	20.0-30.0
	1260 °C	20.0-30.0
Cambio lineal permanente (%) NTC - 988, ASTM C - 401, ASTM C - 865	110 °C	0.0-0.2C
	1000 °C	0.5C-0.5E
Presentación (Sacos)	25 kg	

## Ladrillo aislante

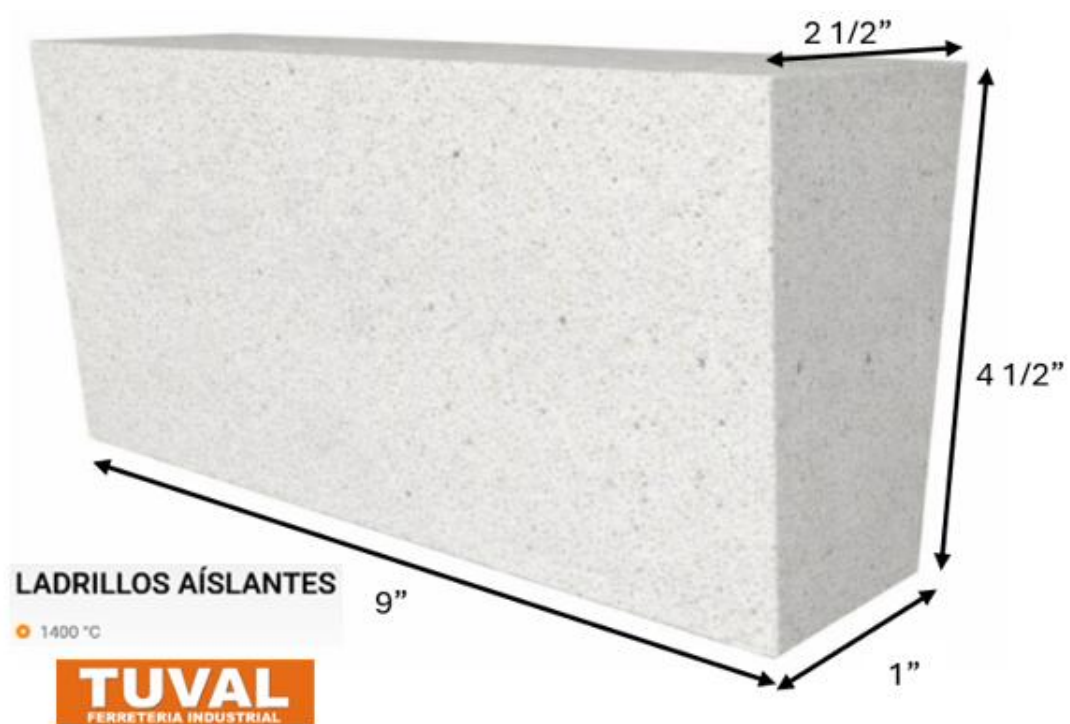
**Tabla D 2**

Propiedades de ladrillo aislante refractario 1400°C

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
• Calor específico	$c_{p,\text{ladrillo}}$	0.98	kJ/kg·K
• Densidad	$\rho_{\text{ladrillo}}$	900	kg/m <sup>3</sup>
• Conductividad térmica	$k_{\text{ladrillo}}$	0.32	W/m·K

**Figura D 3**

Ladrillo aislante tipo "ARCO 3" (TUVAL, Ecuador)



*Nota.* El modelo "ARCO 3" es ideal para hornos de tamaños medianos, no muy grandes, con el fin de obtener una estructura cilíndrica. Sus medidas son estándares.

## Figura D 4

Ficha técnica de ladrillo aislante 1400°C (ERECOS, Colombia)

Versión: 01
Aprobó: Fabio Vargas - Ing I+D
Fecha de vigencia: 21/12/2021

**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

## ER IFB 2600

### Aislamiento térmico

Los ladrillos refractarios aislantes se caracterizan por su baja densidad, la cual le confiere una baja conductividad térmica. Esta propiedad los hace óptimos para ser empleados en hornos industriales donde el ahorro energético es una importante condición de diseño. Son fabricados con materias primas y procesos especiales para obtener alta porosidad, baja densidad y alta refractariedad. Los ladrillos aislantes se utilizan como respaldo de ladrillos densos de mayor refractariedad y conductividad térmica.

### Propiedades

Clasificación	Aislante grupo 26	
ASTM C-155, NTC-815		
Composición química (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	52.0
	SiO <sub>2</sub>	45.0
	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	0.8
	Otros Óxidos	2.2
Máxima temperatura de servicio (°C)		1400
Densidad volumétrica (gr/cm <sup>3</sup> ) NTC - 676, ASTM C - 134		0.8
Resistencia a la compresión en frío (MPa) NTC - 628, ASTM C - 133		1.6
Módulo de ruptura en frío (MPa) NTC - 628, ASTM C - 133		1.3
Cambio lineal permanente temperatura (%) 1400°C		0.6C
	200 °C	0.23
	400 °C	0.27
	600 °C	0.30
	800 °C	0.33
Conductividad térmica (W/mK)	1000 °C	0.36

*Nota.* El catálogo de TIVAL ofrece ladrillos refractarios aluminoso-densos 1400°C, aunque no expresa un nombre específico, la ficha técnica de ERECOs brinda un ladrillo ER IFB2600 silíceo aluminoso.

### Manta de fibra cerámica

**Tabla D 3**

*Propiedades de manta de fibra cerámica 1260°C*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
• Calor específico	$C_{p,manta}$	1.05	kJ/kg·K
• Densidad	$\rho_{manta}$	128	kg/m <sup>3</sup>
• Conductividad térmica	$k_{manta}$	0.21	W/m·K

**Figura D 5**

*Manta de fibra cerámica (TUVAL, Ecuador)*



## Figura D 6

Ficha técnica de manta de fibra cerámica 1260°C (ERECOS, Colombia)

Versión: 01
Aprobó: Fabio Vargas - Ing I+D
Fecha de vigencia: 25/11/2021



## MANTA CERÁMICA 1260

### Propiedades

Composición química (%)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	45-50		
	SiO <sub>2</sub>	50-57		
	Otros	<1		
Color		Blanca		
Temperatura de clasificación (°C)		1260		
Temperatura de uso continuo (°C)		1200		
Punto de fusión (°C)		1760		
Diametro de fibra (µm)		2.5-3.5		
Calor específico (J/Kg K) 1100 °C		1.130 - 1.330		
Cambio lineal permanente (%) 1200 °C		<3		
Dimensiones (mm)	Espesor	6, 13, 25, 38, 51		
	Ancho	610, 1220		
	Largo	3660, 7620, 14640, 21960		
Conductividad térmica (W/m K)	Densidad (Kg/m <sup>3</sup> )	64	96	128
	260 °C	0.10	0.07	0.06
	400 °C	0.13	0.118	0.105
	538 °C	0.19	0.15	0.12
	600 °C	0.22	0.18	0.16
	800 °C	0.32	0.24	0.235
	816 °C	0.33	0.25	0.24
	982 °C	0.43	0.34	0.26
	1000 °C	0.49	0.435	0.325
	1093 °C	0.50	0.44	0.33

**Lámina de acero al carbono A36**

**Tabla D 4**

*Propiedades de acero A36*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
• Calor específico	$c_{p,A36}$	0.49	kJ/kg·K
• Densidad	$\rho_{A36}$	7850	kg/m <sup>3</sup>
• Conductividad térmica	$k_{A36}$	50	W/m·K
• Límite elástico	$\sigma_{yA36}$	250	MPa

**Figura D 7**

*Lamina de acero al carbono A36 de 3mm (DIPAC, Ecuador)*

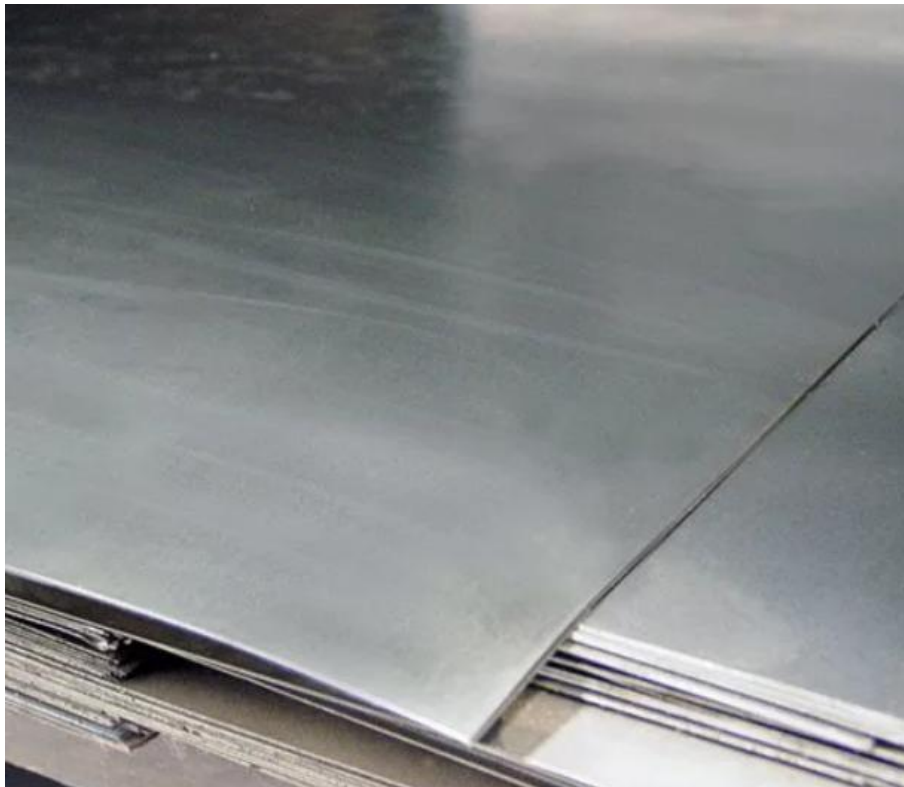


Figura D 8

Ficha técnica de acero al carbono A36 (DIPAC, Ecuador)



Descripción	Composición Química %					Pruebas Mecánicas				Prueba de Flexibilidad		
	C max	Si	Mn	P max	S max	Resistencia Mecánica psi (kgf/mm <sup>2</sup> )	Punto de Fluencia psi (kgf/mm <sup>2</sup> ) min	Elongación		Espesor en (mm)	Ángulo de doblado	Radio de Curva Diámetro del espesor de la Muestra
								Muestra in.(mm)	% min			
Grade A				0,04	0,05					3/4(19.1) y menores		
Grade B	0,21		0,80-1,10	0,04	0,05	58,000 (40,8) – 71,000 (49,9)	32,000 (22,5)	GL=8(200)	21			3
Grade C	0,23	0,15-0,30	0,60-0,90	0,04	0,05			GL=2(50)	24	Sobre 3/4 to 1 1/4 (31.8), incl.	180°	3
Grade CS	0,18	0,15-0,30	1,00-1,35	0,04	0,05					Sobre 1 1/4		3
Grade E	0,18	0,15-0,30	0,70-1,35	0,04	0,05							
Grade R	0,24		0,60-0,90	0,04	0,05							

## DIMENSIONAMIENTO DEL HORNO

Dado análisis de carga de aluminio que usa la empresa como punto máximo en un día laboral, tomamos en consideración medidas aproximadas a las actuales para su nuevo diseño tanto para el cuerpo como para el crisol.

### Espesor de pared del cuerpo

- El horno actual trabaja con una holgura de 5 cm, lo cual es una medida apropiada, ya que se recomienda una holgura entre 4 a 6 cm por lado para la circulación uniforme de gases alrededor del crisol (Ramos & Quispe, 2021, p. 45).
- Teniendo las especificaciones del crisol y sabiendo que la temperatura objetivo para la lámina de metal se estima de 50°C.
- Para estimar la altura L, considerando la elevación del crisol de unos 10 cm como valor óptimo, y como holgura superior, 10 cm de espacio antes de la tapa. Esto es

muy importante para una mejor distribución de calor. Con esto, el valor de L será de 60cm.

- Para el coeficiente de convección  $h_{conv}$ , calculamos:

$$T_{película} = \frac{T_{ambiente} + T_3}{2} \text{ [K]}$$

$$T_{película} = \frac{293K + 323K}{2} = 308K$$

$$\beta = \frac{1}{T_{película}} \text{ [1/K]}$$

$$\beta = \frac{1}{308 \text{ K}} = 3.245 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$$

Con la  $T_{película} = 35.15^\circ\text{C}$ , nos dirigimos a la Tabla B 5 e interpolamos:

**Tabla D 5** Propiedades del aire a una temperatura de película de  $35.15^\circ\text{C}$

<b>k</b> (W/mK)	<b><math>\nu</math>[<math>\times 10^{-5}</math>]</b> ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	<b><math>\alpha</math>[<math>\times 10^{-5}</math>]</b> ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	<b><math>\beta</math>[<math>\times 10^{-3}</math>]</b> ( $\text{m}^2/\text{s}$ )	<b>Pr<sub>cuerp</sub></b>
0.02626	1.656	2.279	3.245	0.727

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

$$Ra = \frac{\left(\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(3.245 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}\right) (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})(0.60\text{m})^3}{\left(\frac{1.656 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right) \left(\frac{2.279 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right)}$$

$$Ra = 5.47 \times 10^8$$

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot Ra_{cuerp}^{1/6}}{\left(1 + \left(\frac{0.492}{Pr_{cuerp}}\right)^{9/16}\right)^{8/27}} \right]^2$$

Obtenemos:

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387(5.47 \times 10^8)^{1/6}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{0.727} \right)^{9/16} \right)^{8/27}} \right]^2$$

$$Nu_{\text{cuerp}} = 102.4$$

$$h_{\text{conv}} = \frac{Nu_{\text{cuerp}} \cdot k}{L_{\text{cuerp}}} \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Obtenemos:

$$h_{\text{conv}} = \frac{(102.4) \left( \frac{0.02626 \text{ W}}{\text{mK}} \right)}{0.60 \text{ m}}$$
$$h_{\text{conv}} = 4.48 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Para el coeficiente de convección  $h_{\text{rad}}$ , calculamos:

$$h_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma (T_4 + T_0)(T_4^2 + T_0^2) \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Donde la emisividad  $\varepsilon$ , se lo aproxima a un valor de 0.77, debido a que es nuevo y no oxidado como el caso actual.

Obtenemos:

$$h_{\text{rad}} = (0.77)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(323 \text{ K} + 293 \text{ K})[(323 \text{ K})^2 + (293 \text{ K})^2]$$

$$h_{\text{rad}} = 5.12 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

- Igualando el flujo de calor en el ambiente con que el flujo de calor en las paredes radiales del horno (cemento, ladrillo, manta). De las ecuaciones (2.28), (2.36).

$$Q_{\text{cuerpo}} = Q_{\text{ambiente}}$$

$$2\pi L \left[ \frac{T_1 - T_4}{\frac{\ln(r_2/r_1)}{k_{\text{concreto}}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_{\text{ladrillo}}} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_{\text{manta}}}} \right] = 2\pi r_4 L (h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}}) [(T_4 - T_0)]$$

De manera iterativa se encontrarán los radios, siendo estos los espesores de cada capa.

Donde:

$$T_1 = 710^\circ\text{C}$$

$$T_4 = 50^\circ\text{C}$$

$$r_1 = (12.5 + 5)\text{cm} = 17.5\text{cm} = 0.175\text{m}$$

$$r_2 = (17.5 + 1)\text{cm} = 18.5\text{cm} = 0.185\text{m}$$

$$r_3 = (18.5 + 11.43)\text{cm} = 29.93\text{cm} = 0.2993\text{m}$$

En este caso los valores de  $r_1$ ,  $r_2$  y  $r_3$  son valores fijos, el que varía es  $r_4$ , debido al cambio de espesor de la manta de fibra cerámica. Según la ficha técnica mostrada en la Figura D, los espesores parten de 25mm, 38mm y 51mm.

Reduciendo la expresión, tenemos:

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{(h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}})2\pi r_4 L}$$

$$R_{\text{total}} = \frac{1}{2\pi L} \left( \frac{\ln(r_2/r_1)}{k_{\text{concreto}}} + \frac{\ln(r_3/r_2)}{k_{\text{ladrillo}}} + \frac{\ln(r_4/r_3)}{k_{\text{manta}}} \right) + R_{\text{ext}} \text{ [K/W]}$$

$$Q = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{total}}} \text{ [W]}$$

$$T_4 = T_0 + R_{\text{ext}} Q \text{ [K]}$$

Para espesor de 25mm:

$$r_4 = (29.93 + 2.5)\text{cm} = 32.43\text{cm} = 0.3243\text{m}$$

$$R_{\text{cemento}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi L k_{\text{cemento}}} = \frac{\ln(18.5/17.5)}{2\pi(0.6\text{m})(1.7 \text{ W/mK})} = 0.00867 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{ladrillo}} = \frac{\ln(r_3/r_2)}{2\pi L k_{\text{ladrillo}}} = \frac{\ln(29.93/18.5)}{2\pi(0.6\text{m})(0.32 \text{ W/mK})} = 0.39879 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{manta}} = \frac{\ln(r_4/r_3)}{2\pi L k_{\text{manta}}} = \frac{\ln(32.43/29.93)}{2\pi(0.6\text{m})(0.21 \text{ W/mK})} = 0.10133 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{(h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}})2\pi r_4 L} = \frac{1}{\left(4.48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} + 5.12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}\right) 2\pi(0.3243\text{m})(0.6\text{m})}$$

$$R_{\text{ext}} = 0.08520 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{total}} = (0.00867 + 0.39879 + 0.10133 + 0.08520)\text{K/W} = 0.59400\text{K/W}$$

$$Q = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{total}}} = \frac{720^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{0.59400\text{K/W}} = 1178.46 \text{ W}$$

$$T_4 = T_0 + R_{\text{ext}} Q = 293\text{K} + (0.08520\text{K/W})(1178.46\text{W}) = 393.40\text{K}$$

$$T_4 = 120.41 \text{ }^\circ\text{C}$$

A continuación, los valores para espesores de 38 mm y 51 mm:

**Tabla D 6**

*Valores de temperatura para espesor de manta disponibles*

Manta	$R_{\text{manta}}$ (K/W)	$R_{\text{ext}}$ (K/W)	$R_{\text{total}}$ (K/W)	Q(W)	$T_4$ (°C)
25 mm	0.10133	0.08520	0.59400	1178.46	<b>120.41</b>
38 mm	0.15098	0.08192	0.64036	1093.14	<b>109.55</b>
51 mm	0.19875	0.07888	0.68509	1021.77	<b>100.60</b>

Dado que los valores de temperatura no cumplen con el requisito de 50°C en la temperatura externa, se aplicará una capa adicional de aislamiento entre la manta cerámica y la cubierta metálica. La lana de roca se considera una opción viable debido a su capacidad para soportar temperaturas elevadas y condiciones más exigentes, en contraste con la lana de vidrio, que, a pesar de su menor costo, resulta más adecuada para sistemas de baja a media temperatura.

**Tabla D 7**

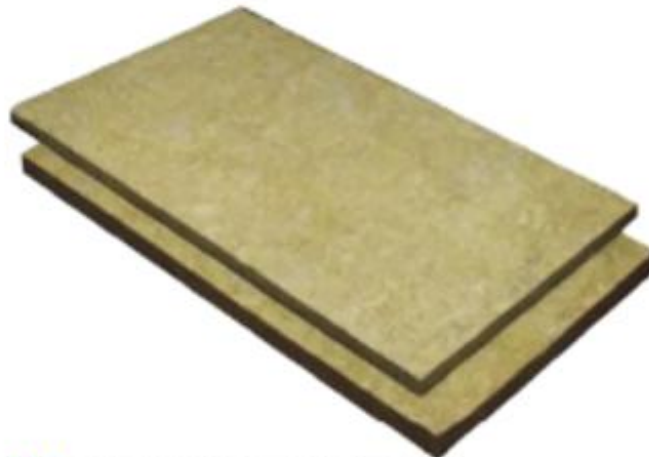
*Valores de temperatura para espesor de manta disponibles*

Parámetro	Símbolo	Valor	Unidad
• Calor específico	$c_{p, \text{ lana}}$	0.83	$\text{kJ/kg}\cdot\text{K}$
• Densidad	$\rho_{\text{ lana}}$	70	$\text{kg/m}^3$
• Conductividad térmica	$k_{\text{ lana}}$	0.034	$\text{W/m}\cdot\text{K}$

**Figura D 9**

*Panel de Lana de Roca 70 kg/m<sup>3</sup> (AISLANTES EC, Ecuador)*

**LANA DE ROCA  
70KG/M3**



**AISLANTES EC**  
Aislantes para la CONSTRUCCIÓN E INDUSTRIA

**Figura D 10**

Ficha técnica panel de lana de roca (AISLANTES EC, Ecuador)

**Presentación:**

Paneles, Opciones de presentación:

ESPESOR (mm) (NP EN 823)	Dimensiones (mm) (NP EN 822)
50*	1200x600

**Tolerancias:**

Espesor (Clase T4): -3% hasta -3 mm A+ 5% hasta +5 mm

Largo: ± 2%

Ancho: ± 1.5%

Paquetes de 8 Unidades

\*Espesor en stock 50 mm, otros espesores bajo pedido

**PROPIEDADES FÍSICAS DE LOS MATERIALES**

Resistencia Térmica, RD

EN 12667  
EN 12939

ESPESOR (mm)	30	40	50	60	80	100
Rp (m2.K/W)	0.85	1.15	1.45	1.75	2.35	2.90

CONDUCTIVIDAD TÉRMICA,  $\lambda_D$   
Valor declarado:  $\lambda_D = 0.034$  W/m.K

EN 12667  
EN 12939

REACCIÓN AL FUEGO  
Incombustible - EUROCLASE A1

EN 1350-1  
ISO 1182

ABSORCIÓN DE AGUA  
 $WS \leq 1.00$  kg/m<sup>2</sup>

NP EN  
1609

FACTOR DE DIFUSIÓN AL VAPORES DE AGUA  
 $\mu = 1.30$

EN 12086

COEFICIENTE DE ABSORCIÓN ACÚSTICA,  $\alpha_s$

EN ISO  
354

*Nota.* El espesor en stock es 50mm, otra medida será bajo pedido.

El radio 5 estará en función del espesor de la manta de 38 mm, siendo este un valor viable entre las tres opciones disponibles. Comprobando si cumple con la temperatura requerida en base a las propiedades y el espesor disponible:

$$r_4 = (29.93 + 3.8)\text{cm} = 33.73\text{cm} = 0.3373\text{m}$$

$$r_5 = (33.73 + 5)\text{cm} = 38.73\text{cm} = 0.3873\text{m}$$

$$R_{\text{lana}} = \frac{\ln(r_5/r_4)}{2\pi L k_{\text{lana}}} = \frac{\ln(38.73/33.73)}{2\pi(0.6\text{m})(0.034 \text{ W/mK})} = 1.07841 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{(h_{\text{conv}} + h_{\text{rad}})2\pi r_5 L} = \frac{1}{\left(4.48 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} + 5.12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}\right) 2\pi(0.3873\text{m})(0.6\text{m})}$$

$$R_{\text{ext}} = 0.07134$$

$$R_{\text{total}} = (0.00867 + 0.39879 + 0.15098 + 1.07841 + 0.07134)\text{K/W}$$

$$R_{\text{total}} = 1.70819 \text{ K/W}$$

$$Q = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{total}}} = \frac{720^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{1.70819\text{K/W}} = 409.79 \text{ W}$$

$$T_5 = T_0 + R_{\text{ext}} Q = 293\text{K} + (0.07134\text{K/W})(409.79\text{W}) = 322.23\text{K}$$

$$T_5 = 49.23 \text{ }^\circ\text{C}$$

## **Apéndice E (cálculo de eficiencia y tablas para horno mejorado)**

Usamos los mismos pasos del horno actual para analizar el comportamiento que tendrá el horno mejorado. Previamente se obtuvieron los resultados de los aportes energéticos para fundir el aluminio en Anexos C, manejándose con el mismo tipo de crisol de acero al carbono.

### **calor para elevar la temperatura**

$$q_s = 17.39 \text{ MJ}$$

### **calor para fusión**

$$q_L = 13.23 \text{ MJ}$$

### **calor para vertido**

$$q_{liq} = 4.32 \text{ MJ}$$

### **calor sobre el crisol A36**

$$q_{\text{crisol,A36}} = 6.14 \text{ MJ}$$

### **Determinación de la energía total de la fusión**

De la ecuación (2.16):

$$q_{\text{útil,fusión}} = q_s + q_L + q_v \quad [J]$$

Obtenemos:

$$q_{\text{útil,fusión}} = 17.39 \text{ MJ} + 13.23 \text{ MJ} + 4.32 \text{ MJ}$$

$$q_{\text{útil,fusión}} = 34.94 \text{ MJ}$$

### **Determinación del calor sobre el crisol**

De la ecuación (2.14):

$$q_{\text{crisol}} = m_{\text{crisol}} \cdot c_{p,A36} (T_f - T_0) \quad [J]$$

$$q_{\text{crisol}} = (18.18 \text{ kg})(0.49 \text{ kJ/kg} \cdot \text{K})(710^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) \quad [J]$$

$$q_{\text{crisol}} = 6.14 \text{ MJ}$$

### Energía útil de fundición

$$Q_{\text{útil,fundición}} = 41.08 \text{ MJ}$$

Para un tiempo de fusión de 60 minutos, el calor útil de fundición es:

$$Q_{\text{útil,fundición}} = \frac{41.08 \text{ MJ}}{3600 \text{ s}}$$

$$Q_{\text{útil,fundición}} = 11.41 \text{ kW}$$

### Calor requerido por unidad de masa para el aluminio y el crisol en conjunto

- *Peso total (aluminio y crisol)*

$$\text{Peso}_{\text{total}} = 51.51 \text{ kg}$$

- *Consumo de calor por kilogramo*

$$q_{\text{kg}} = 797.51 \text{ kJ/kg}$$

### Determinación de la capacidad de calentamiento

**Tabla E 1**

*Registro de datos dimensionales del horno mejorado*

Parámetros	Valor
• Altura	102.46 cm
• Diámetro	77.46 cm
• Espesor de pared de cuerpo	21.23 cm
• Espesor de base	21.23cm
• Espesor de tapa	21.23cm
• Espesor de lámina metálica	0.3 cm

**Tabla E 2**

*Registro de datos dimensionales del crisol*

Parámetros	valor
• Altura	40 cm
• Diámetro	25 cm
• Espesor	0.8 cm
• Peso	40 lb

- *Área total interna (cámara)*

Área de la base

Considerando el radio del horno:

$$r_b = (12.5 + 5)\text{cm} = 17.5\text{cm} = 0.175\text{m}$$

De la ecuación:

$$A_{\text{base}} = \pi r_b^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

Obtenemos:

$$A_{\text{base}} = \pi(0.175\text{m})^2$$

$$A_{\text{base}} = 0.0962 \text{ m}^2$$

Área interna del cuerpo

De la ecuación:

$$A_{\text{cuerpo,int}} = 2\pi r_i \cdot H \text{ [m}^2\text{]}$$

Donde:

$$r_i = r_b$$

$$H = (102.46 - 21.23 - 21.23)\text{cm} = 60\text{cm} = 0.60 \text{ m}$$

Obtenemos:

$$A_{\text{cuerpo,int}} = 2\pi(0.175\text{m})(0.60\text{m})$$

$$A_{\text{cuerp,int}} = 0.6597 \text{ m}^2$$

Área del crisol

El cálculo de su área es relacionado al de un cilindro hueco.

De la ecuación (2.25):

$$A_{\text{crisol}} = 2\pi r \cdot h + \pi r^2 \text{ [m}^2\text{]}$$

Donde:

$$r_{\text{cri}} = 12.5\text{cm} = 0.125\text{m}$$

$$h = 40\text{cm} = 0.4\text{m}$$

obtenemos:

$$A_{\text{crisol}} = 2\pi(0.125\text{m})(0.4\text{m}) + \pi(0.125\text{m})^2$$
$$A_{\text{crisol}} = 0.363 \text{ m}^2$$

#### Área interna de la tapa

Considerando el radio del horno:

$$r_{\text{t,i}} = (12.5 + 5)\text{cm} = 17.5\text{cm} = 0.175\text{m}$$

De la ecuación:

$$A_{\text{tapa}} = \pi(r_{\text{t,i}}^2 - r_{\text{a}}^2) \text{ [m}^2\text{]}$$

Donde:

$r_{\text{a}}^2 = 9\text{cm}$  : es el radio del agujero central de escape de gases

Obtenemos:

$$A_{\text{tapa}} = \pi(0.03062\text{m}^2 - 0.0081\text{m}^2)$$
$$A_{\text{tapa}} = 0.07076 \text{ m}^2$$

#### Área lateral del agujero en la tapa

$$A_{\text{lat,agujero}} = 2\pi r_{\text{a}} e_{\text{t}}$$

$$A_{\text{lat,agujero}} = 2\pi(0.09\text{m})(0.2123\text{m})$$

$$A_{\text{lat,agujero}} = 0.12008\text{m}^2$$

#### Área total de la cámara de combustión

Obtenemos el área total de la cámara con la ecuación (2.26):

$$A_{\text{cámara}} = A_{\text{base}} + A_{\text{cuerpo,int}} + A_{\text{crisol}} + A_{\text{tapa}} + A_{\text{lat,agujero}} \text{ [m}^2\text{]}$$

$$A_{\text{cámara}} = 0.09621 \text{ m}^2 + 0.65973 \text{ m}^2 + 0.3632 + 0.07076 + 0.12008 \text{ m}^2$$

$$A_{\text{cámara}} = 1.31003 \text{ m}^2$$

Calculamos la capacidad de calentamiento. De la ecuación (2.27):

$$\text{Cap}_{\text{calentamiento}} = \frac{\text{Peso}_{\text{total}}}{t \cdot A_{\text{cámara}}} \text{ [kg/m}^2\text{]}$$

Obtenemos:

$$\text{Cap}_{\text{calentamiento}} = \frac{51.51 \text{ kg}}{(1\text{h})(1.31003 \text{ m}^2)}$$

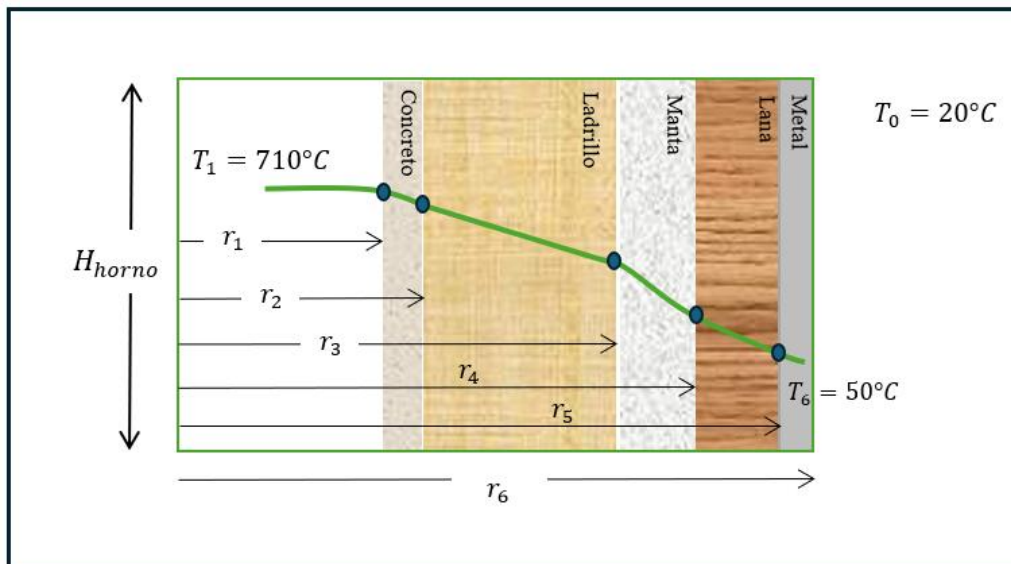
$$\text{Cap}_{\text{calentamiento}} = 39.31 \text{ kg/h} \cdot \text{m}^2$$

**Transferencia de calor en las paredes y al ambiente usando analogía de resistencias eléctricas**

El horno mejorado está constituido por cinco capas para evitar en mayor parte la disipación de calor en sus paredes, siendo el cemento refractario, ladrillo aislante, manta cerámica, lana de roca y la lámina metálica. Tanto la base como la tapa tendrán estos componentes.

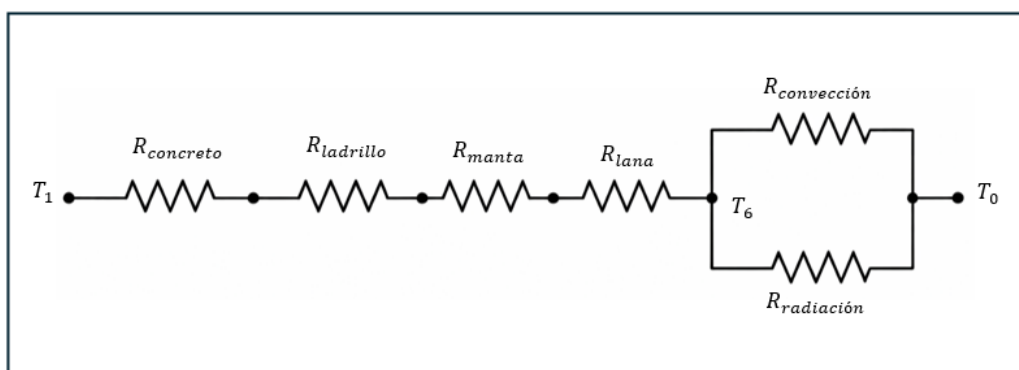
**Figura E 1**

*Esquema de las capas del horno constituida por cinco materiales*



**Figura E 2**

*Esquema de resistencias térmicas proporcionada por cada material*



*Nota.* El metal no es considerado en este análisis, porque se asume que la temperatura es la misma que la lana de roca.

- *Pérdida de calor para el cuerpo del horno*

En la Figura D vemos el orden de las capas para el cuerpo del horno. Los radios ya se determinaron en la selección de los materiales:

$$r_1 = (12.5 + 5)\text{cm} = 17.5\text{cm} = 0.175\text{m}$$

$$r_2 = (17.5 + 1)\text{cm} = 18.5\text{cm} = 0.185\text{m}$$

$$r_3 = (18.5 + 11.43)\text{cm} = 29.93\text{cm} = 0.2993\text{m}$$

$$r_4 = (29.93 + 3.8)\text{cm} = 33.73\text{cm} = 0.3373\text{m}$$

$$r_5 = (33.73 + 5)\text{cm} = 38.73\text{cm} = 0.3873\text{m}$$

El comportamiento de la pérdida de calor en el cuerpo del horno dio como resultado:

$$Q_{\text{cuerpo}} = Q = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{total}}} = \frac{720^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{1.70819\text{K/W}} = 409.79\text{ W}$$

- *Pérdida de calor para la base del horno*

El comportamiento de las resistencias térmicas mostrada en la figura D sucede en la base, debido a que está compuesta de los mismos materiales. Para determinar los valores de  $h_{\text{conv}}$  y  $h_{\text{rad}}$ , usamos la ecuación (1.9):

$$Ra_{\text{base}} = \frac{g \cdot \beta \cdot \Delta T \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

Primero determinamos el valor de  $L_{\text{base}}$  por la razón del área superior del horno.

$$L_{\text{base}} = \frac{A_{\text{base}}}{P_{\text{base}}} [\text{m}]$$

$$L_{\text{base}} = \frac{0.7746\text{ m}}{4}$$

$$L_{\text{base}} = 0.1937\text{ m}$$

Con la información de la Tabla E 1, Obtenemos:

$$Ra_{\text{base}} = \frac{\left(\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(3.245 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}\right) (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}) (0.1937\text{m})^3}{\left(\frac{1.656 \times 10^{-5}\text{m}^2}{\text{s}}\right) \left(\frac{2.279 \times 10^{-5}\text{m}^2}{\text{s}}\right)}$$

$$Ra_{base} = 1.7 \times 10^7$$

Determinamos el número de Nusselt. De la ecuación (2.11):

Obtenemos:

$$Nu_{base} = 0.27Ra^{1/4}; 10^7 \leq Ra_{base} \leq 10^{11}; \text{laminar}$$

$$Nu_{base} = 0.27(1.7 \times 10^7)^{1/4}$$

$$Nu_{base} = 17.6$$

Para el respectivo cálculo del coeficiente de convección en la parte inferior del horno. De la ecuación (2.12):

$$h_{conv,base} = \frac{Nu_{base} \cdot k}{L_{base}} [W/m^2 \cdot K]$$

Obtenemos:

$$h_{conv,base} = \frac{(17.6) \left( \frac{0.02626W}{mK} \right)}{0.19365 m}$$

$$h_{conv,base} = 2.38 W/m^2 \cdot K$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación. De la ecuación (2.33):

$$h_{rad,base} = \epsilon \sigma (T_{base} + T_0)(T_{base}^2 + T_0^2) [W/m^2 \cdot K]$$

Obtenemos:

$$h_{rad,base} = (0.77)(5.67 \times 10^{-8} W/m^2 \cdot K^4)(323K + 293K)[(323K)^2 + (293K)^2]$$

$$h_{rad,base} = 5.12 W/m^2 \cdot K$$

La resistencia por convección generada en las capas de la base es:

$$R_{cemento} = \frac{e_{concreto}}{A_{base} \cdot k_{cemento}} = \frac{0.01m}{(0.47124m^2)(1.7 W/mK)} = 0.01248 K/W$$

$$R_{ladrillo} = \frac{e_{ladrillo}}{A_{base} \cdot k_{ladrillo}} = \frac{0.1143m}{(0.47124m^2)(0.32 W/mK)} = 0.75797 K/W$$

$$R_{\text{manta}} = \frac{e_{\text{manta}}}{A_{\text{base}} \cdot k_{\text{manta}}} = \frac{0.038\text{m}}{(0.47124\text{m}^2)(0.21 \text{ W/mK})} = 0.38399 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{lana}} = \frac{e_{\text{lana}}}{A_{\text{base}} \cdot k_{\text{lana}}} = \frac{0.05\text{m}}{(0.47124\text{m}^2)(0.034 \text{ W/mK})} = 3.12067 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{conv}} = (0.01248 + 0.75797 + 0.38399 + 3.12067) \frac{\text{K}}{\text{W}} = 4.27511 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

La resistencia en el exterior cambia en su base:

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{(h_{\text{conv,base}} + h_{\text{rad,base}})\pi r^2}$$

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{\left(2.38 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} + 5.12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}\right) \pi (0.3878)^2} = 0.2829 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

La resistencia total en la base:

$$R_{\text{total}} = (4.27511 + 0.2829)\text{K/W}$$

$$R_{\text{total}} = 4.5580 \text{ K/W}$$

Por lo tanto, la pérdida de calor en la base:

$$Q_{\text{base}} = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{total}}} = \frac{720^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{4.5580\text{K/W}} = 153.57 \text{ W}$$

- *Pérdida de calor para la tapa del horno*

La parte superior se la asumirá con la misma composición de la base en cuanto a sus capas. Un agujero de escape de gases de combustión de 18 cm, ajustado para evitar añadir una “chimenea”.

El cálculo de los coeficientes de convección y radiación cambian por su configuración del área a comparación de su base:

$$L_{\text{tapa}} = \frac{A_{\text{tapa}}}{P_{\text{tapa}}} [\text{m}]$$

$$L_{\text{tapa}} = \frac{0.68 - 0.18 \text{ m}}{4}$$

$$L_{\text{tapa}} = 0.125 \text{ m}$$

Con la información de la Tabla E 1, Obtenemos:

$$Ra_{\text{tapa}} = \frac{\left(\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(3.245 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}\right) (50^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})(0.125\text{m})^3}{\left(\frac{1.656 \times 10^{-5}\text{m}^2}{\text{s}}\right) \left(\frac{2.279 \times 10^{-5}\text{m}^2}{\text{s}}\right)}$$

$$Ra_{\text{tapa}} = 4.94 \times 10^6$$

Determinamos el número de Nusselt. De la ecuación (1.11):

Obtenemos:

$$Nu_{\text{tapa}} = 0.54Ra^{1/4}; 10^4 \leq Ra_{\text{tapa}} \leq 10^7; \text{laminar}$$

$$Nu_{\text{tapa}} = 0.54(4.94 \times 10^6)^{1/4}$$

$$Nu_{\text{tapa}} = 25.46$$

$$h_{\text{conv,tapa}} = \frac{Nu_{\text{tapa}} \cdot k}{L_{\text{tapa}}} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

Obtenemos:

$$h_{\text{conv,tapa}} = \frac{(25.46) \left(\frac{0.02626\text{W}}{\text{mK}}\right)}{0.125 \text{ m}}$$

$$h_{\text{conv,tapa}} = 5.35 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación. De la ecuación (2.12):

$$h_{\text{rad,tapa}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{tapa}} + T_0)(T_{\text{tapa}}^2 + T_0^2) [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

Obtenemos:

$$h_{\text{rad,tapa}} = (0.77)(5.67 \times 10^{-8} \text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)(323\text{K} + 293\text{K})[(323\text{K})^2 + (293\text{K})^2]$$

$$h_{\text{rad,tapa}} = 5.12 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$$

La resistencia por convección generada en las capas de la base es:

$$R_{\text{cemento}} = \frac{e_{\text{concreto}}}{A_{\text{tapa}} \cdot k_{\text{cemento}}} = \frac{0.01\text{m}}{(0.3376\text{m}^2)(1.7 \text{ W/mK})} = 0.01742 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{ladrillo}} = \frac{e_{\text{ladrillo}}}{A_{\text{tapa}} \cdot k_{\text{ladrillo}}} = \frac{0.1143\text{m}}{(0.3376\text{m}^2)(0.32 \text{ W/mK})} = 1.05800 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{manta}} = \frac{e_{\text{manta}}}{A_{\text{tapa}} \cdot k_{\text{manta}}} = \frac{0.038\text{m}}{(0.3376\text{m}^2)(0.21 \text{ W/mK})} = 0.53599 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{lana}} = \frac{e_{\text{lana}}}{A_{\text{tapa}} \cdot k_{\text{lana}}} = \frac{0.05\text{m}}{(0.3376\text{m}^2)(0.034 \text{ W/mK})} = 4.35600 \text{ K/W}$$

$$R_{\text{conv}} = (0.01742 + 1.05800 + 0.53599 + 4.35600) \frac{\text{K}}{\text{W}} = 5.9517 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

La resistencia en el exterior cambia en la tapa:

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{(h_{\text{conv,tapa}} + h_{\text{rad,tapa}})A_{\text{tapa}}}$$

$$R_{\text{ext}} = \frac{1}{\left(5.35 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K} + 5.12 \frac{\text{W}}{\text{m}^2} \cdot \text{K}\right) (0.3376)} = 0.281 \frac{\text{K}}{\text{W}}$$

La resistencia total en la tapa:

$$R_{\text{total}} = (5.9517 + 0.281)\text{K/W}$$

$$R_{\text{total}} = 6.2327 \text{ K/W}$$

Por lo tanto, la pérdida de calor en la tapa:

$$Q_{\text{tapa}} = \frac{T_1 - T_0}{R_{\text{total}}} = \frac{720^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C}}{6.2327\text{K/W}} = 112.31 \text{ W}$$

- *Pérdida de calor por el agujero del horno*

Simulando el agujero como una placa tipo disco horizontal. Determinamos el valor de  $L_{\text{agujero}}$  por la razón del área superior del horno. De la ecuación:

$$L_{\text{agujero}} = \frac{0.18 \text{ m}}{4}$$

$$L_{\text{agujero}} = 0.045 \text{ m}$$

Obtenemos:

$$Ra_{\text{agujero}} = \frac{\left(\frac{9.81\text{m}}{\text{s}^2}\right) \left(1.645 \times 10^{-3} \frac{1}{\text{K}}\right) (650^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C})(0.045\text{m})^3}{\left(\frac{5.24 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right) \left(\frac{7.90 \times 10^{-5} \text{m}^2}{\text{s}}\right)}$$

$$Ra_{\text{agujero}} = 2.24 \times 10^5$$

El número de Nusselt se obtiene simulando la parte superior sin tapa como una placa horizontal.

Con el valor de  $Ra_{\text{agujero}} = 2.24 \times 10^5$  y de  $Pr_{\text{agujero}} = 0.66$ , determinamos el número de Nusselt. De la ecuación (2.11):

Obtenemos:

$$Nu_{\text{agujero}} = 0.54Ra^{1/4}; 10^4 \leq Ra_{\text{agujero}} \leq 10^7; \text{laminar}$$

$$Nu_{\text{agujero}} = 0.54(2.24 \times 10^5)^{1/4}$$

$$Nu_{\text{agujero}} = 11.71$$

Para el respectivo cálculo del coeficiente de convección en la parte superior del horno. De la ecuación (2.12):

$$h_{\text{conv,agujero}} = \frac{Nu_{\text{agujero}} \cdot k}{L_{\text{agujero}}} [\text{W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}]$$

Obtenemos:

$$h_{\text{conv,agujero}} = \frac{(11.71) \left(\frac{0.0495\text{W}}{\text{mK}}\right)}{0.045\text{m}}$$

$$h_{\text{conv,agujero}} = 12.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

El coeficiente de transferencia de calor por radiación. De la ecuación (2.33):

$$h_{\text{rad,agujero}} = \varepsilon\sigma(T_{\text{agujero}} + T_{\infty})(T_{\text{agujero}}^2 + T_{\infty}^2) \text{ [W/m}^2 \cdot \text{K]}$$

Obtenemos:

$$h_{\text{rad,agujero}} = (0.95)(5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4)(923\text{K} + 293\text{K})[(923\text{K})^2 + (293\text{K})^2]$$

$$h_{\text{rad,agujero}} = 61.42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$$

La pérdida de calor superior de manera simultánea se determina de la ecuación (2.15):

$$Q_{\text{agujero}} = (h_{\text{conv,agujero}} + h_{\text{rad,agujero}})A_{\text{agujero}}(T_{\text{sup}} - T_0) \text{ [W]}$$

Obtenemos:

$$Q_{\text{agujero}} = (12.9 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K} + 61.42 \text{ W/m}^2 \cdot \text{K})(0.025\text{m}^2)(923\text{K} - 293\text{K})$$

$$Q_{\text{agujero}} = 1.19\text{kW}$$

### **Pérdida total de calor en el horno**

Para el cálculo total del calor en el horno, sumaremos las pérdidas de calor generado por las paredes y la parte superior del horno. De la ecuación (2.15):

$$Q_{\text{pérdidas}} = Q_{\text{cuerpo}} + Q_{\text{inferior}} + Q_{\text{tapa}} + Q_{\text{agujero}} \text{ [W]}$$

$$Q_{\text{pérdidas}} = 409.79\text{W} + 153.57\text{kW} + 112.31\text{W} + 1190\text{W} = 1.86 \text{ kW}$$

### **Determinación del calor total por medio de balance energético**

Mediante la ley de conservación de la energía, ecuación (2.16):

$$Q_{\text{Total}} = Q_{\text{pérdidas}} + Q_{\text{útil,fundición}} \text{ [W]}$$

$$Q_{\text{Total}} = 1.86\text{kW} + 11.41\text{kW}$$

Obtenemos:

$$Q_{\text{Total}} = 13.27\text{kW}$$

### **Determinación del consumo de combustible**

El consumo del combustible se estima en base al consumo calorífico del horno y el poder calorífico inferior del gas GLP:

$$m_{\text{GLP}} = \frac{(13.27\text{kW})(3600\text{s})}{45605.60\text{kJ/kg}} = 1.05\text{kg en una hora}$$

Pese a que el GLP en Ecuador es subsidiado y relativamente económico, la ineficiencia igual cuesta dinero. Anteriormente se conoció que el precio de cada cilindro es de USD 2.50 y el peso neto de 15kg, esto daría una relación de 0.167 USD/kg.

- En 5.48 kg/h de consumo en el horno actual, tenemos:

$$(5.48\text{kg/h})(0.167\text{USD/kg}) = 0.91\text{USD/h}$$

En cuanto a las tres tandas que se planteó y la masa de 8.50 kg de GLP por tanda, tenemos:

$$(8.5 \text{ kg/tanda})(3) = 25.50 \text{ kg/día}$$

Con cada cilindro de 15kg de contenido, nos da 1.70 cilindros/ día, lo que equivale a casi dos cilindros diarios, con un costo de USD 4.50 por día.

La información de la empresa resulta ser parecida al resultado obtenido, ya que se indicó que diariamente para esa cantidad carga, se consume un poco más de 2 cilindros diarios. Esto podría darse porque, durante el proceso, existen fugas en las válvulas, un flujo de llama que no se detiene hasta el final del proceso, ya que normalmente no se trabaja por tandas, sino por carga constante.

- En 1.05 kg/h de consumo en el horno actual, tenemos:

$$(1.05\text{kg/h})(0.167\text{USD/kg}) = 0.18\text{USD/h}$$

$$(1.05 \text{ kg/tanda})(3) = 3.15 \text{ kg/día}$$

Con cada cilindro de 15kg de contenido, nos da 0.21 cilindros/ día, lo que equivale a menos de un cilindro diario, con un costo de \$0.53 por día. Pese a que sí existe una disminución en el consumo, este valor es teórico, lo que podría resultar más consumo de gas conociéndose su cantidad experimental durante el proceso.

Por lo tanto, tendremos un ahorro diario de USD 3.72, lo que equivale a USD 59 mensuales, considerando un promedio de 4 días laborables a la semana.

### **Determinación de la eficiencia del horno**

Para obtener la eficiencia “teórica”, usamos la relación de calor útil para el metal y el calor total del sistema usamos la ecuación (B.1):

$$\eta_{\text{horno}} = \frac{Q_{\text{útil, fundición}}}{Q_{\text{Total}}}$$

Obteniendo:

$$\eta_{\text{horno}} = \frac{11.41 \text{ kW}}{13.27 \text{ kW}} = 0.85$$

$$\eta_{\text{horno}} = 85\%$$

## Apéndice F (quemador para gas GLP y de medidor de temperatura)

La potencia térmica requerida por el horno mejorado no es aún la potencia que el quemador debería tener. El quemador debe seleccionarse para una carga térmica mayor y en hornos a gas se usa típicamente un factor de sobredimensionamiento de 1.2 a 1.4, debido a sus pérdidas no modeladas, arranques en frío, variación de presión del GLP (Trinks et al, 2004).

Por lo que la potencia nominal recomendada sería:

$$Q_{\text{quemador}} = (1.3)Q_{\text{total}}$$

$$Q_{\text{quemador}} = (1.3)(13.27) = 17.3\text{kW}$$

Dado que el horno es cerrado, con un orificio de salida de 18cm, cámara relativamente compacta y temperatura superior a los 700°C, se debería elegir un quemador entre 15 y 20 kW, lo cual no conviene un quemador doméstico simple como el que se usa actualmente.

- *Verificación con consumo de GLP*

$$m_{\text{GLP}} = \frac{(13.27\text{kW})}{45605.60\text{kJ/kg}} = 1.36\text{kg/h}$$

Lo cual cuadra con los 1.05kg/h en un horno mejorado bien aislado.

Considerando un margen de diseño de 30% para compensar pérdidas no modeladas y condiciones transitorias, se seleccionará un quemador de GLP con una potencia nominal de aproximadamente 18kW, valor coherente con un consumo estimado del orden de 1.3kg/h de GLP.

El ducto tangencial ubicado en el cuerpo del horno para la alimentación de calor a unos 10° de inclinación, se lo diseña también con un diámetro de aproximadamente 2 ½" y espesor de 1/2", ideal para un horno de características medianas.

En el mercado se encuentran quemadores de forja de propano tipo Venturi evaluados alrededor de los USD

75, aunque superen el margen requerido de potencia, son ideales para hornos medianos de fundición de metales.

**Figura F 1**

*Quemador de forja de propano tipo Venturi 100.00BTU≈29.3kW*



*Nota.* La potencia es mayor al rango objetivo de 18kW; sin embargo, es normal seleccionar un quemador sobredimensionado y luego regularlo correctamente.

**Figura F 2**

*Ficha técnica de forja de propano tipo Venturi 100.00BTU≈29.3kWFigura H 1*

<b>FICHA TÉCNICA</b>	
<b>QUEMADOR TIPO VENTURI PARA GAS GLP</b>	
<b>Descripción general:</b> Quemador tipo Venturi para gas GLP, de aspiración natural sin soplador, diseñado para aplicaciones térmicas como hornos de fundición, hornos artesanales, calderos pequeños y equipos industriales. El sistema Venturi permite la mezcla aire-gas mediante depresión generada por el paso del GLP a través del inyector.	
Parámetro	Especificación
Tipo de quemador	Venturi (aire primario por aspiración natural)
Combustible	Gas Licuado de Petróleo (GLP)
Material del cuerpo	Hierro fundido
Tubo de extensión	Acero inoxidable
Longitud total	14 pulgadas (= 36 cm)
Longitud cuerpo hierro	7.5 pulgadas (= 19 cm)
Longitud tubo acero inoxidable	3 pulgadas (= 75 mm)
Rosca de conexión	3/4 pulgada
Entrada de gas	Espiga para manguera Ø 10 mm
Diámetro exterior extremo	2 pulgadas (= 50 mm)
Regulación de gas	Válvula manual integrada
Tipo de llama	Difusiva, ajustable según caudal de gas
Sistema de control	Manual (compatible con válvula de aguja o regulador externo)
<b>Aplicaciones típicas:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Hornos de fundición de aluminio</li><li>• Hornos artesanales y metalmecánicos</li><li>• Calderos y sistemas térmicos de baja y media potencia</li><li>• Equipos industriales sin ventilación forzada</li></ul>	
<b>Recomendaciones de seguridad:</b> <ul style="list-style-type: none"><li>• Utilizar regulador de presión adecuado para GLP.</li><li>• Verificar estanqueidad de conexiones antes de la operación.</li><li>• Operar en ambientes ventilados.</li><li>• No modificar el inyector sin recalcular la relación aire-combustible.</li></ul>	
<b>Observaciones:</b> Las dimensiones y características indicadas son referenciales y pueden variar ligeramente según el fabricante. La potencia térmica depende del diámetro del inyector, presión de suministro y condiciones de operación.	

## Apéndice G (cálculos y tablas para control térmico)

### Control térmico PID

**Figura G 1**

*Controlador PID REX C-100 de RK Instruments (Tienda cerámica, Ecuador)*



Sensor de doble pantalla LED que muestra en tiempo real la temperatura actual (PV) y la temperatura objetivo (SV). Opera con un rango de temperatura de  $-199.9^{\circ}\text{C}$  a  $1372^{\circ}\text{C}$ , precisión  $\pm 1^{\circ}\text{C}$ . Ideal para horno de fundición de aluminio (Tienda cerámica, s.f).

**Figura G 2**

*Ficha técnica REX C-100 de RK Instruments*

## FICHA TÉCNICA – CONTROLADOR DE TEMPERATURA REX-C100

Parámetro	Descripción / Especificación
Modelo	REX-C100
Tipo de equipo	Controlador de temperatura digital PID
Principio de funcionamiento	Control automático mediante algoritmo PID (Proporcional, Integral y Derivativo)
Alimentación eléctrica	100 – 240 V AC, 50/60 Hz
Consumo de energía	< 10 VA
Tipo de entrada	Termocupla tipo K (estándar)
Sensores compatibles	J, E, T, S, R, B, N, PT100 (según versión)
Rango de control	0 °C – 400 °C (dependiente del sensor)
Precisión	±0.5 % del fondo de escala o ±1 °C
Resolución	14 bits
Tiempo de muestreo	0.5 s
Salida de control	Relay 3 A / 250 V AC o salida SSR (según configuración)
Modo de control	PID y ON/OFF seleccionable
Función Auto-tuning	Sí
Alarmas	Configurables por límites superior e inferior
Pantalla	Doble display LED (PV y SV)
Indicadores	Estado de salida, alarma y auto-sintonía
Temperatura de operación	0 – 50 °C
Humedad relativa	30 – 85 % sin condensación
Dimensiones frontales	48 × 48 mm
Corte de panel	45 × 45 mm
Profundidad	98 – 110 mm
Peso aproximado	0.17 kg
Aplicaciones	Homos, fundición, cerámica, calefacción industrial

## Termocupla tipo K

Figura G 3

Termocupla tipo K industrial THL TCK-BRRS01 (THERMOLASER, Perú)



Sensor de temperatura de alta robustez mecánica es ideal para este tipo de tareas térmicas, mantienen un rango de medición entre  $-200^{\circ}\text{C}$  a  $1260^{\circ}\text{C}$  y precisión entre  $\pm 2.2^{\circ}\text{C}$ ,  $\pm 0.75$ . Fácilmente se integran a controladores PID, indicadores digitales y PLC (IEC,2013).

Figura G 4

Ficha técnica THL TCK-BRRS01

<b>FICHA TÉCNICA – TERMOCOUPLA TIPO K</b>	
<b>Modelo: THL TCK-BRRS01</b>	
<b>Parámetro</b>	<b>Especificación técnica</b>
<b>Modelo</b>	THL TCK-BRRS01
<b>Tipo</b>	Termocupla industrial Tipo K (Cromel–Alumel)
<b>Configuración</b>	Bulbo recto extralargo
<b>Principio de medición</b>	Efecto Seebeck
<b>Conexión al proceso</b>	Roscada (NPT o métrica)
<b>Material del bulbo</b>	Acero refractario ferroso
<b>Tipo de punta</b>	Cerrada
<b>Longitud del sensor</b>	Extralarga ( $\geq 300$ mm)
<b>Diámetro del bulbo</b>	6 – 12 mm
<b>Rango de medición</b>	–200 °C a 1260 °C
<b>Rango recomendado</b>	0 °C a 1100 °C
<b>Exactitud</b>	Clase 2 IEC 60584
<b>Tiempo de respuesta</b>	1 – 3 s
<b>Aislamiento interno</b>	Óxido de magnesio (MgO)
<b>Cabezal</b>	Metálico industrial, IP65
<b>Señal de salida</b>	mV
<b>Compatibilidad</b>	PID, PLC, indicadores
<b>Aplicaciones</b>	Procesos térmicos agresivos, hornos
<b>Normativa</b>	IEC 60584 / ANSI MC96.1
<b>Certificaciones</b>	ISO 9001, ISO 45001 (UKAS / NQA)

### Determinación de ajuste térmico, mediante sesgo sistemático

Dado que la termocupla tipo K no se encuentra en contacto directo con el baño metálico, la medición obtenida corresponde a una temperatura indirecta afectada por resistencias térmicas y radiación. En instrumentación, este tipo de medición se modela mediante un sesgo sistemático, expresado de forma general como la diferencia entre la magnitud real y la medida (Bentley, 2005). La temperatura del metal se calcula a partir de la ecuación 2.21:

$$T_{\text{metal}} = T_k + \Delta$$

Donde  $\Delta$  representa el desfase térmico asociado a la disposición del sensor. Considerando las condiciones radiactivas del horno y recomendaciones para hornos de fundición, se adopta un rango conservador de  $\Delta = 50 - 120^{\circ}\text{C}$  para una punta sobresalida de 1 a 2 cm, coherente con errores reportados para sensores montados en paredes o puertos de hornos industriales (Baukal, 2013).

Esta configuración también es pensada para que la entrada tangencial de la llama no reciba impacto directo con la punta, aunque recibe radiación del refractario y la medición sigue siendo indirecta, la lectura es más estable que si la punta quedara en el flujo de llama.

Dado que la temperatura debe cumplir  $T_{\text{metal}} \leq 710^{\circ}\text{C} \rightarrow T_k + \Delta \leq 710^{\circ}\text{C}$

Se considera el peor caso  $\Delta = 120^{\circ}\text{C}$ :

$$T_k = 710^{\circ}\text{C} - 120^{\circ}\text{C}$$

$$T_k = 590^{\circ}\text{C}$$

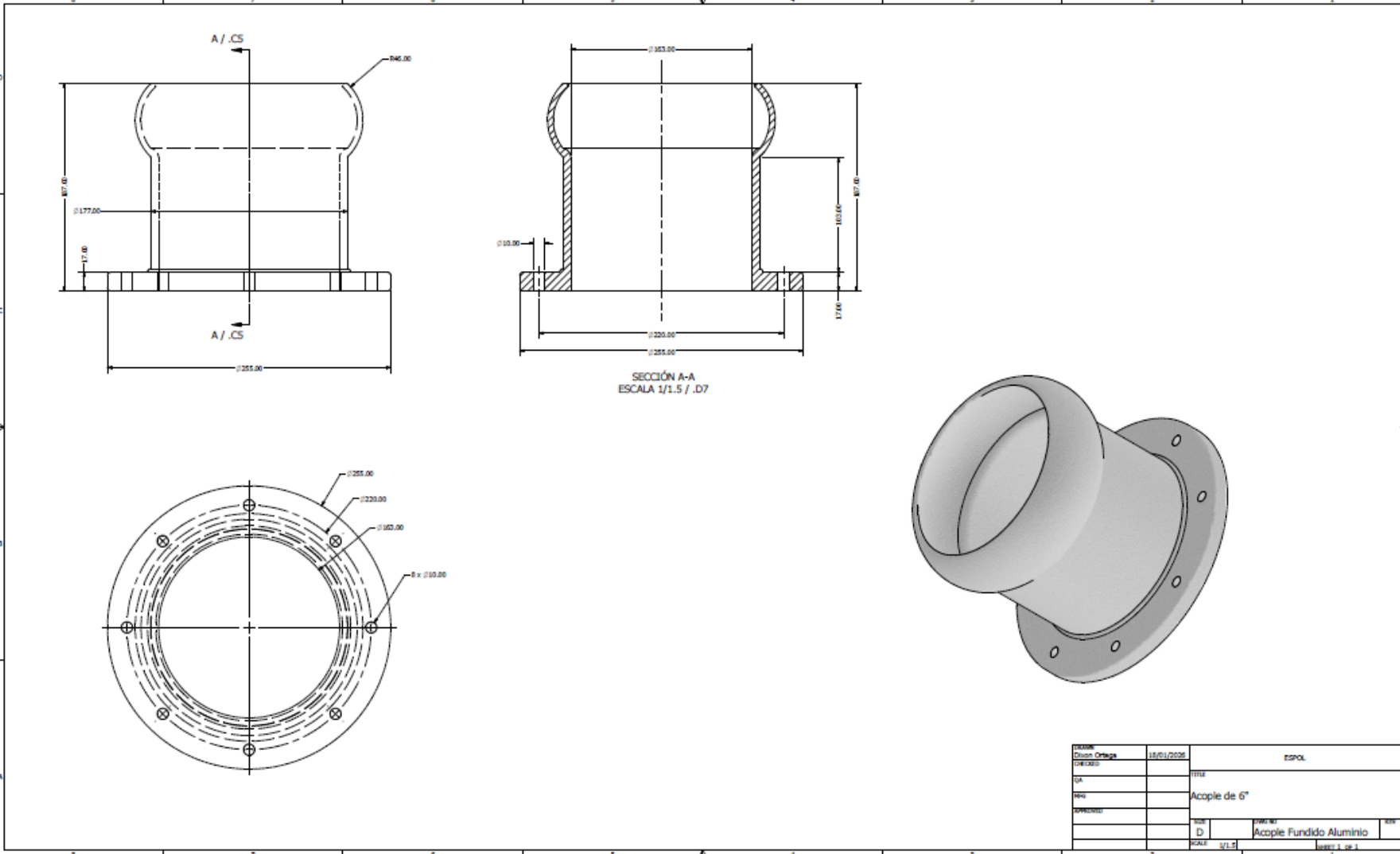
#### Configuración operativa recomendada en el PID

Para una punta sobresalida de 1 a 2 cm hacia el agujero, con  $\Delta_{\text{max}} = 120^{\circ}\text{C}$ :

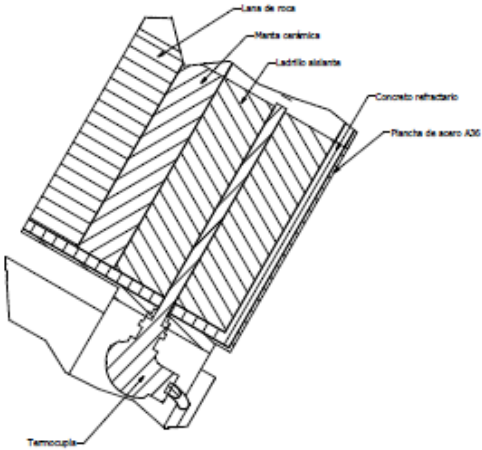
- Punto caliente:  $590^{\circ}\text{C}$ , con un margen de  $\pm 10^{\circ}\text{C}$
- La alarma se alerta a una temperatura alrededor de los  $600^{\circ}\text{C}$
- Control de la salida de gas GLP para controlar llama cuando la temperatura llegue a los  $580^{\circ}\text{C}$



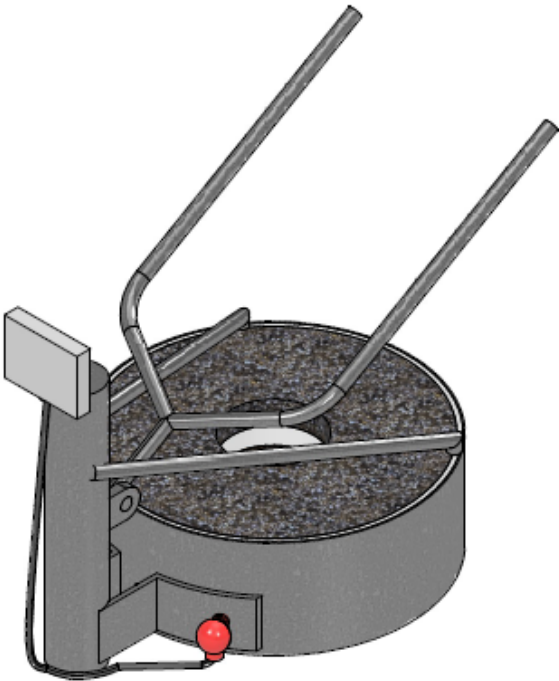
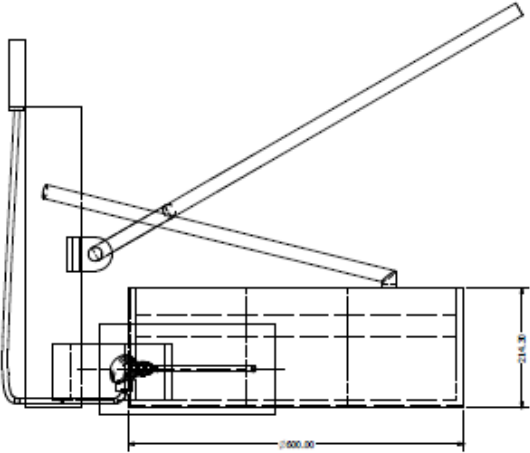
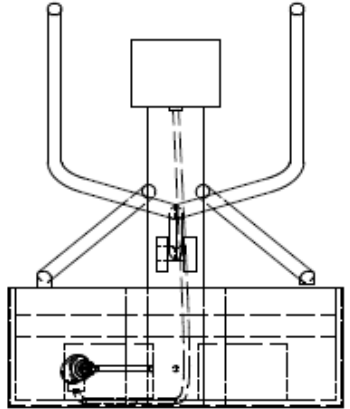
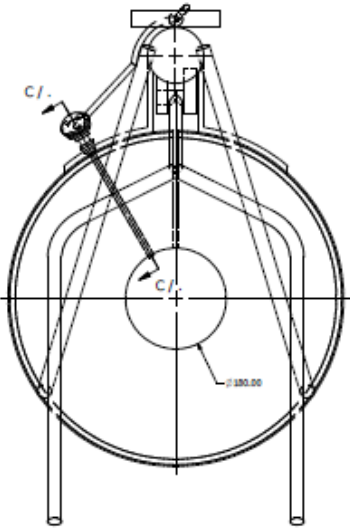
Plano 2 Pieza Final



Plano 3 Horno tapa



DETALLE C  
ESCALA 1 / 2 /.



DESIGN	15/01/2006	ESPOL	
CREADO		TAPA DE HORNO	
CA			
REV			
PROYECTADO			
		NO. DE	REV
	D	Horno Tapa	
HOJA	1 / 3.0	HOJA 1 DE 1	

# Plano 4 Horno

