

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO  
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA  
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA**



**TESIS**

---

**ANÁLISIS TECNOLÓGICO EN LOS HORNOS DE CRISOL A GAS Y DE  
RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA LA FUSIÓN DE PLATA EN JOYERIAS DE LA  
REGIÓN CUSCO  
(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

---

**Presentado por:**

- **Bach. FARFAN CACERES, T'ika Cristina**
- **Bach. QUISPE QUISPE, Cesar Augusto**

**Para optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico**

**Asesor:**

Ing. AVILES HINOJOSA, Leonardo

CUSCO – PERÚ

2024

# INFORME DE ORIGINALIDAD

(Aprobado por Resolución Nro.CU-303-2020-UNSAAC)

El que suscribe, Asesor del trabajo de investigación/tesis titulada: Análisis tecnológico en los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para la fusión de plata en joyerías de la región Cusco (Investigación tecnológica)

presentado por: Tika Cristina Faján Cáceres con DNI Nro.: 70169676 presentado por: Cesar Augusto Quispe Quispe con DNI Nro.: 72534378 para optar el título profesional/grado académico de Ingeniero Metalúrgico

Informo que el trabajo de investigación ha sido sometido a revisión por tres veces, mediante el Software Antiplagio, conforme al Art. 6° del **Reglamento para Uso de Sistema Antiplagio de la UNSAAC** y de la evaluación de originalidad se tiene un porcentaje de 6%.

Evaluación y acciones del reporte de coincidencia para trabajos de investigación conducentes a grado académico o título profesional, tesis

Porcentaje	Evaluación y Acciones	Marque con una (X)
Del 1 al 10%	No se considera plagio.	X
Del 11 al 30 %	Devolver al usuario para las correcciones.	
Mayor a 31%	El responsable de la revisión del documento emite un informe al inmediato jerárquico, quien a su vez eleva el informe a la autoridad académica para que tome las acciones correspondientes. Sin perjuicio de las sanciones administrativas que correspondan de acuerdo a Ley.	

Por tanto, en mi condición de asesor, firmo el presente informe en señal de conformidad y adjunto la primera página del reporte del Sistema Antiplagio.

Cusco, 14 de Agosto de 2024

Firma

Post firma LEONARDO ALÍCES HINOJOSA

Nro. de DNI 23984953

ORCID del Asesor 0000-0002-1851-9172

Se adjunta:

1. Reporte generado por el Sistema Antiplagio.

2. Enlace del Reporte Generado por el Sistema Antiplagio: oid: 27254:372060678

NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS TECNOLÓGICO EN LOS HORNOS DE CRISOL A GAS Y DE RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA LA FUSIÓN DE PLAT**

AUTOR

**FARFAN CACERES, T'ika Cristin**

RECUENTO DE PALABRAS

**27564 Words**

RECUENTO DE CARACTERES

**144367 Characters**

RECUENTO DE PÁGINAS

**176 Pages**

TAMAÑO DEL ARCHIVO

**4.8MB**

FECHA DE ENTREGA

**Aug 8, 2024 6:49 PM GMT-5**

FECHA DEL INFORME

**Aug 8, 2024 6:51 PM GMT-5****● 6% de similitud general**

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 6% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 0% Base de datos de trabajos entregados
- 0% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

**● Excluir del Reporte de Similitud**

- Material bibliográfico
- Coincidencia baja (menos de 30 palabras)
- Material citado
- Bloques de texto excluidos manualmente

**DEDICATORIA**

*Dedico este paso de mi vida con mucho cariño a mis padres Celia, José y Rocío, quienes siempre me apoyan y son mi mejor ejemplo de superación y fortaleza para poder alcanzar todas mis metas anheladas.*

*A mi hermana Killa por inspirarme a mejorar cada día y ser su modelo a seguir, a mis nonas Florencia y María por ser mi pilar emocional, así como a toda mi querida familia.*

*A mi querida facultad, por los años que me acogió en sus aulas junto a mis docentes y compañeros, formándome profesionalmente para llegar a ser ingeniera.*

*A mi querida institución el Cuerpo General de Bomberos Voluntarios del Perú, donde puedo desempeñar mi vocación y a todas mis amistades que durante este proceso me han alentado con sus mensajes y llamadas para no rendirme hasta culminar este objetivo.*

*A todos ustedes gracias por confiar en mí y ser mi mejor inspiración de vida.*

**T'ika Cristina, FARFÁN CÁCERES**

**DEDICATORIA**

*A Dios por ser mi fuerza, fortaleza, sabiduría  
e inspiración en toda etapa de mi vida.*

*A mis padres Dora Quispe y Leonidas Quispe, por  
su amor, paciencia y apoyo incondicional en toda  
área de mi vida, y los valores inculcados desde  
muy niño.*

*A mi hermana Yanina por ser ese referente y  
soporte emocional en mi vida, y a mi hermano  
Ramiro por permitirme ser parte de sus luchas  
y sueños.*

*A mis docentes, amigos y compañeros que fueron  
de apoyo constante en mi formación personal y  
académica.*

**César Augusto, QUISPE QUISPE**

## AGRADECIMIENTO

Primeramente, a Dios por darnos la vida y en su inmenso amor permitirnos gozar con salud, sus bendiciones y la razón de ser, que cada día nos da la oportunidad de seguir el rumbo de nuestras vidas que se nos dio como regalo por parte del Ser Supremo.

A nuestros padres a quienes les debemos toda la vida por darnos su comprensión, su amor y su enseñanza de seguir luchando, que son ellos quienes nos enseñaron a levantarnos de cada caída en el camino de la vida.

A nuestros hermanos por su apoyo incondicional y su ayuda que estamos agradecidos por todo lo brindado para poder seguir adelante y hacer de cada uno de nosotros mejores personas, quienes fueron una motivación para nosotros.

Agradecemos a los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, por la enseñanza brindada lo cual es de muy valioso para nuestra formación profesional. Gracias por su dedicación y su compromiso; por impartir conocimiento y formar profesionales con un futuro y ser útiles para nuestra sociedad.

Atentamente: César y T'ika

## **PRESENTACIÓN**

SEÑOR Mgt. FREDY VICTOR BUSTAMANTE PRADO DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA SEÑORES CATEDRATICOS MIEMBROS DEL JURADO:

En cumplimiento al reglamento de grados y títulos para optar al título profesional de Ingeniero Metalúrgico, de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, facultad de Geológica, Minas y Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, ponemos a vuestra consideración la tesis intitulada:

**“ANÁLISIS TECNOLÓGICO EN LOS HORNOS DE CRISOL A GAS Y DE RESISTENCIA ELÉCTRICA PARA LA FUSIÓN DE PLATA EN JOYERÍAS DE LA REGIÓN CUSCO”.**

**(INVESTIGACIÓN TECNOLÓGICA)**

El presente trabajo de investigación tecnológica tiene como finalidad el análisis tecnológico de los hornos de crisol a gas y resistencia eléctrica que son principales fuentes de labor en la industria joyera de la ciudad del Cusco. Así mismo evaluaremos la eficiencia de cada horno para la producción de joyas, dando alcances de mejora para la fusión del metal más usado la plata y aleaciones en la industria joyera y optimizando las condiciones de trabajo.

**Los tesistas.**

## RESUMEN

El presente proyecto de investigación se realizó un análisis tecnológico comparativo entre los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica utilizados para la fusión de plata en las joyerías del Cusco. La investigación tiene como objetivo determinar cuál de estas tecnologías es más eficiente y adecuada, considerando aspectos técnicos de operación, rendimiento, temperatura, fuente de calor, tiempo de fusión, mantenimiento, calidad del producto final y satisfacción del usuario. Se aplicó el diseño descriptivo comparativo, ya que recoge información de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica, a partir de la fundición de la plata, y en función a las variables independientes como son: el tiempo de fusión, temperatura y la energía calorífica. Se hizo dos pruebas de fundición para cada horno, utilizando la misma cantidad de plata, en donde se determinó la pérdida de calor por conducción y convección a través de las paredes de los hornos. Esto permitió obtener resultados en lo que se refiere a la cantidad necesario de calor suministrado por los hornos, balance de energía, eficiencia, y a la vez ayudo en la identificación de los problemas técnicos de operación que afectaron en el rendimiento de ambos hornos. Por lo tanto, se concluye que el horno eléctrico tiene un rendimiento del 88.29%, superando al rendimiento del horno de crisol, que es del 81.25%.

*Palabras clave:* fundición, Horno de crisol, Horno de resistencia eléctrica, rendimiento.

## ABSTRACT

The present research project conducts a comparative technological analysis between gas crucible and electric resistance furnaces used for silver melting in jewelry shops in Cusco. The research aims to determine which of these technologies is more efficient and suitable, considering technical aspects of operation, performance, temperature, heat source, melting time, maintenance, final product quality, and user satisfaction. Experimental design was applied the comparative descriptive design, as it collects information from gas crucible and electric resistance furnaces, based on silver melting, and considering independent variables such as melting time, temperature, and heat energy. Two melting tests were conducted for each furnace, using the same amount of silver, where heat loss through the furnace walls by conduction and convection was determined. This allowed obtaining results regarding the amount of heat required by the furnaces, energy balance, efficiency, and also aided in identifying operational technical problems affecting the performance of both furnaces. Therefore, it is concluded that the electric furnace has an efficiency of 88.29%, surpassing the performance of the crucible furnace, which is 81.25%.

Keywords: Crucible furnace, Electric resistance furnace, melting, performance.

**SIMBOLOS Y NOMENCLATURA**

**A:** Amperios.

**AET:** Área total de pérdida de calor.

**°C:** Grados Celsius.

**Hc:** Coeficiente de transferencia de calor por convección.

**I:** Intensidad de corriente eléctrica.

**K:** Coeficiente de conductividad térmica del material.

**°K:** Grados Kelvin.

**Kcal/h:** Kilocalorías por hora.

**kJ/kg:** Kilojulios por kilogramos.

**Kw/h:** kilowatt por hora.

**M:** Masa.

**L:** Longitud/Altura.

**Nu:** Número de Nusselt.

**P:** Poder calorífico.

**Pr** = Numero de Prandtl.

**Q<sub>ab</sub>:** Es el calor que pierde a través de aberturas.

**Q<sub>cond.</sub>:** Calor por conducción.

**Q<sub>P conv.</sub>:** Pérdida por convección

**Q<sub>fundición</sub> :** Cantidad de calor que se requiere para el proceso de fundición de la plata.

**Q<sub>S</sub>:** Cantidad de calor suministrado (kJ)

**Q<sub>P rad.</sub>:** Pérdida de calor por radiación.

**$Q_{T Ag}$**  : Cantidad total de calor perdido de la plata.

**r**: Radio.

**$R_a$** : Número de Rayleigh.

**R**: Resistencia eléctrica.

**Re**: Número de Reynolds.

**Ta**: Temperatura ambiente.

**T°**: Temperatura de la pared exterior e interior del horno.

**T**: Tiempo.

**TG**: Temperatura interna del horno.

**T1**: Temperatura interna del horno.

**T2**: Temperatura

**T3**: Temperatura en la manija metálica.

**V**: Voltios

**Vi**: Viscosidad

**W/m°C**: Unidad de capacidad de conducción térmica.

**$\eta$** : Rendimiento del horno de fundición

**$\sigma$** : Constante Stefan-Boltzmann.

**$\Delta T$**  = variación de temperatura.

**INDICE GENERAL**

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO .....	IV
PRESENTACIÓN .....	V
RESUMEN .....	VI
ABSTRACT .....	VII
SIMBOLOS Y NOMENCLATURA .....	VIII
INDICE GENERAL.....	X
INDICE DE TABLAS.....	XV
INDICE DE FIGURAS .....	XVIII
INDICE DE ANEXOS .....	XX
CAPITULO I.....	1
1.1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	1
1.2. Planteamiento del problema.....	1
1.3. Formulación del problema objeto de investigación .....	2
1.3.1. Problema General.....	2
1.4. Problemas Específicos.....	2
1.4.1. Problema Específico 1 .....	2
1.4.2. Problema Específico 2.....	2

1.4.3.	Problema Especifico 3 .....	2
1.5.	Justificación .....	3
1.5.1.	Justificación Tecnológica .....	3
1.5.2.	Justificación Social.....	3
1.5.3.	Justificación Económica .....	3
1.5.4.	Justificación Ambiental .....	4
1.5.5.	Limitaciones para la investigación .....	4
1.6.	Objetivos.....	4
1.6.1.	Objetivo General .....	4
1.7.	Objetivos Específicos .....	5
1.7.1.	Objetivo Específico 1 .....	5
1.7.2.	Objetivo Específico 2 .....	5
1.7.3.	Objetivo Especifico 3 .....	5
1.8.	Hipótesis .....	5
1.8.1.	Hipótesis general.....	5
1.9.	Hipótesis especifica .....	5
1.9.1.	Hipótesis especifica 1 .....	5
1.9.2.	Hipótesis especifica 2 .....	6
1.9.3.	Hipótesis especifica 3 .....	6
1.10.	Variables .....	6

1.10.1.	Variable Independientes .....	6
1.10.2.	Variable dependiente .....	6
1.10.3.	Variable interviniente o externa .....	6
1.11.	Indicadores .....	7
1.11.1.	Cálculo .....	7
1.11.2.	Materiales .....	7
1.11.3.	Preparación de muestra .....	7
CAPITULO II .....		8
MARCO TEÓRICO .....		8
2.1.	Antecedentes de la Investigación .....	8
2.1.1.	Antecedentes Internacionales .....	8
2.1.2.	Antecedentes nacionales .....	9
2.1.3.	Antecedentes locales .....	10
2.2.	Fundamento Teórico .....	10
2.2.1.	Horno de Crisol .....	10
2.2.2.	Horno eléctrico .....	13
2.2.3.	Horno eléctrico de mufla .....	14
2.2.4.	Estructura interna de los hornos .....	18
2.2.5.	Materiales Refractarios .....	18
2.2.6.	Ladrillos refractarios .....	20

2.2.7.	Hormigones refractarios .....	22
2.2.8.	Aislantes térmicos .....	23
2.2.9.	Generalidades de la combustión.....	26
2.2.10.	Quemadores .....	27
2.2.11.	Conservación de calor dentro del horno .....	28
2.2.12.	Transferencia de calor .....	31
2.2.13.	Balance Energético:.....	44
2.2.14.	La plata (Ag).....	46
CAPITULO III.....		49
PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL .....		49
3.1.	Fundamentos de la experimentación .....	49
3.1.1.	Descripción técnica del horno de crisol a gas (H.1).....	49
3.1.2.	Características técnicas de dimensión del horno de crisol H.1 .....	51
3.1.3.	Pruebas de fundición en el horno de crisol (H.1).....	54
3.1.4.	Análisis de datos obtenidos en la fundición y desarrollo de las expresiones matemáticas	58
3.1.5.	Descripción técnica del horno de resistencia eléctrica o mufla H.2.....	79
3.1.6.	Prueba de fundición en el horno eléctrico H.2.....	82
3.1.7.	Expresiones térmicas aplicadas en la fundición de plata H. 2 .....	86
CAPITULO IV.....		109

ANALISIS DE RESULTADOS .....	109
4.1. Introducción del capítulo .....	109
<b>4.2.</b> 109	
4.2. Análisis de los resultados.....	109
4.2.1. Cantidad de temperatura y tiempo requerida para la fundición de la plata .	111
4.2.2. Cantidad de calor requerida por la plata.....	114
4.2.3. Cantidad de calor requerido por el crisol.....	116
4.2.4. Cantidad de calor para la fundición de plata.....	117
4.2.5. Pérdida de calor por conducción .....	118
4.2.6. Pérdida de calor por convección .....	120
4.2.7. Pérdida total de calor.....	121
4.2.8. Energía total para la fundición de la plata .....	122
4.2.9. Cantidad de calor suministrado por la fuente de calorífica .....	124
4.2.10. Horno eléctrico H.2 (Calor suministrado) .....	125
4.2.11. Rendimiento .....	126
4.3. Valoraciones de la investigación.....	128
4.3.1. Valoración técnica de operación de los hornos H.1 y H.2.....	128
4.3.2. Valoración económica de los hornos H.1 y H.2 .....	129
4.3.3. Valoración en seguridad y medio ambiente de los hornos H.1 y H.2 .....	129
4.4. Ventajas y desventajas en el uso de ambos hornos .....	130

CONCLUSIONES.....	132
RECOMENDACIONES.....	133
REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA .....	134
ANEXOS .....	137

### INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Propiedades de los ladrillos refractarios.. .....	20
Tabla 2 Clasificación de ladrillos silicoaluminosos.. .....	21
Tabla 3 Composición de ladrillos refractarios según su contenido de alúmina.....	22
Tabla 4 Composición química de los hormigones refractarios.....	23
Tabla 5 Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 310.. .....	25
Tabla 6 Poder calorífico de combustibles industriales. ....	26
Tabla 7 Propiedades físicas de la plata. ....	48
Tabla 8 Características de horno de crisol a gas H.1.....	53
Tabla 9 Elementos del sistema de control. ....	53
Tabla 10 Características técnicas del quemador de gas para el horno de crisol H.1.....	54
Tabla 11 Tabla de control de pruebas 1 y 2 en el horno H.1. ....	59
Tabla 12 Resumen de pruebas.....	59
Tabla 13 Propiedades del aire a la temperatura de película de la cubierta metálica. ....	67
Tabla 14 Datos para el cálculo de la pérdida de calor por conducción.. .....	70

Tabla 15 Datos para el cálculo de la pérdida de calor por conducción.....	71
Tabla 16 Propiedades del aire a la temperatura de película de la tapa.....	74
Tabla 17 Datos de cálculo de la pérdida de calor por conducción H.1. ....	77
Tabla 18 Características del horno eléctrico para la fundición de plata H.2. ....	81
Tabla 19 Elementos del sistema de control.....	82
Tabla 20 Tabla de control de pruebas 1 y 2 en el horno H.2. ....	87
Tabla 21 Resumen de pruebas H.2.....	87
Tabla 22 Propiedades del aire a la temperatura de película.....	93
Tabla 23 Datos para el cálculo de pérdida de calor por conducción.....	97
Tabla 24 Datos para el cálculo de la pérdida de calor por convección. ....	98
Tabla 25 Datos para el cálculo de la pérdida de calor por radiación.....	99
Tabla 26 Propiedades del aire a temperatura de película de la cubierta metálica.....	101
Tabla 27 Datos para el cálculo de la pérdida de calor por convección.. ....	104
Tabla 28 Datos para el cálculo de suministro de energía. ....	107
Tabla 29 Descripción de los resultados obtenidos del horno de crisol a gas H.1. ....	110
Tabla 30 Descripción de los resultados obtenidos del horno eléctrico H.2.....	111
Tabla 31 Tabla de promedio de datos obtenidos para el horno H.1.....	112
Tabla 32 Tabla de promedio de datos obtenidos para el horno H.2.....	112
Tabla 33 Descripción del calor requerido por el crisol en el horno H.1.....	115
Tabla 34 Descripción del calor requerido por el crisol en el horno. ....	115

Tabla 35 Descripción del calor requerido por el crisol en el horno H.1.....	116
Tabla 36 Descripción del calor requerido por el crisol en el horno H.2.....	117
Tabla 37 Datos obtenidos para fundición. ....	117
Tabla 38 Datos obtenidos de la pérdida de calor por convección en el horno H.1.....	119
Tabla 39 Datos obtenidos de la pérdida de calor por convección en el horno H.2.....	119
Tabla 40 Datos obtenidos de la pérdida de calor por conducción en el horno H.1.....	120
Tabla 41 Datos de la pérdida de calor por conducción en el horno H.2.....	120
Tabla 42 Datos obtenidos de la pérdida de calor total en el horno H.1.....	121
Tabla 43 Datos obtenidos de la pérdida de calor total en el horno H.2.....	121
Tabla 44 Datos obtenidos de la energía total requerida en el horno H.1.....	123
Tabla 45 Datos obtenidos de la energía total requerida en el horno H.2.....	123
Tabla 46 Datos obtenidos de la cantidad de calor que suministra el horno H.1.....	125
Tabla 47 Datos obtenidos de la cantidad de calor que suministra el horno H.2.....	125
Tabla 48 Datos obtenidos de la pérdida de calor total en el horno H.1.....	126
Tabla 49 Datos obtenidos de la pérdida de calor total en el horno H.2.....	127
Tabla 50 Tabla de ventajas y desventajas.....	131

## INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Esquema de un horno de pozo.....	11
Figura 2 Esquema de un Horno Basculante.....	12
Figura 3 Esquema de un horno rotativo de crisol.....	13
Figura 4 Diagrama de un horno de resistencia eléctrica.....	14
Figura 5 Imagen de un horno eléctrico de mufla. ....	15
Figura 6 Partes constitutivas del horno de resistencia eléctrica.....	16
Figura 7 Esquema de conformación de los materiales refractarios.....	18
Fuente: elaboración propia.....	18
Figura 8 Quemador manual con ventilación eléctrica.....	28
Figura 9 Transferencia de Calor por Conducción Unidimensional.....	33
Figura 10 Tubo cilíndrico con temperaturas de superficie interior y exterior. ....	35
Figura 11 Correlaciones empíricas para el número de Nusselt.....	38
Figura 12 Analogía de la resistencia superficial a la radiación.....	44
Figura 13 Estructura física y grafica del horno de crisol (H.1).....	51
Figura 14 Partes del horno de crisol.....	52
Figura 15 Determinación de masa de la plata en la balanza digital. ....	55
Figura 16 Fúndete Bórax. ....	55
Figura 17 Lingotera de acero para vertido de la colada. ....	56
Figura 18 Etapa de calentamiento del horno.....	56

Figura 19 Fundición de la plata.....	57
Figura 20 Control de la temperatura.....	57
Figura 21 Colado de la plata fundida en la lingotera.....	58
Figura 22 Horno de Crisol H.1.....	60
Figura 23 Perfil de temperaturas en el interior del horno H. 1. ....	65
Figura 24. ....	65
Resistencias térmicas en el horno H. 1 .....	65
Figura 25. Perfil de la temperatura en la tapa del horno H.1 .....	72
Figura 26. Resistencias térmicas en la tapa del horno H.1 .....	73
Figura 27 Cubierta la tapa del horno eléctrico H.2. ....	76
Figura 28 Horno eléctrico para fundición de plata H. 2. ....	80
Figura 29 Peso de la plata a fundir en el horno eléctrico.....	83
Figura 30 Peso real del crisol.....	83
Figura 31 Preparación de moldes de arcilla refractaria. ....	84
Figura 32 Etapa de calentamiento del horno y secado de moldes.....	84
Figura 33 Etapa de función de la plata en el horno eléctrico.....	85
Figura 34 Control de la temperatura del horno eléctrico.....	85
Figura 35 Colado de la plata al molde.....	86
Figura 36 Perfil de temperaturas en el interior del H.2.. ....	91
Figura 37 Resistencias térmicas en el horno H. 2. ....	92

Figura 38. Perfil de temperaturas en el interior de la puerta de horno del H.2 .....	100
Figura 39 Resistencias térmicas en la puerta del horno.....	100
Figura 40 Cubierta de la puerta del horno eléctrico H.2.....	103
Figura 41 Balance de energía en el horno.....	106
Figura 42 Graficas de la temperatura de elevación en el horno H.1 para las pruebas 1 y 2. .....	113
Figura 43 G raficas de la temperatura de elevación en el horno H.2 para las pruebas 1 y 2. .....	114
Figura 44 Cantidad de calor requerido por el crisol. ....	116
Figura 45 Cantidad de calor para fundir plata.....	118
Figura 46 Pérdida total de calor. ....	122
Figura 47 Energía total requerida.....	124
Figura 48 Calor suministrado por los hornos.....	126
Figura 46 Rendimiento. ....	128

## INDICE DE ANEXOS

<b>Anexo 1.</b> Matriz de consistencia.....	138
<b>Anexo 2.</b> Operacionalización de variables .....	139
<b>Anexo 3.</b> Preparación del horno de crisol a gas H.1 .....	140
<b>Anexo 4.</b> Etapa de calentamiento y control de la temperatura en el de crisol a gas H.1.	141

<b>Anexo 6.</b> Verificación y operación del horno de resistencia eléctrica H.2 .....	143
<b>Anexo 7.</b> Determinación del peso de la plata y del crisol .....	144
<b>Anexo 8.</b> Elaboración y precalentamientos de moldes para el horno H.2 .....	145
<b>Anexo 9.</b> Obtención de la plata fundida en horno eléctrico H.2.....	146
<b>Anexo 10.</b> Ficha técnica del cemento refractario.....	147
<b>Anexo 11.</b> Propiedades del aire de 1 atm de presión .....	148
<b>Anexo 12:</b> correlaciones del número promedio de Nusselt .....	149
<b>Anexo 13.</b> Calor latente de fusión y vaporización .....	150
<b>Anexo 14.</b> Tipos de ladrillos refractarios según su temperatura.....	151
<b>Anexo 15:</b> Tabla de emisividad .....	152
<b>Anexo 16:</b> Poder calorífico del propano comercial.....	153
<b>Anexo 17.</b> Planos de medida de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica.....	154

## CAPITULO I

### 1.1. FUNDAMENTOS DE LA INVESTIGACIÓN

#### 1.2. Planteamiento del problema

En la industria de la joyería en Cusco, la fusión de plata es una etapa crucial en el proceso de fabricación de joyas de alta calidad. Este proceso se realiza comúnmente utilizando dos tipos de hornos: los hornos de crisol a gas y los hornos de resistencia eléctrica. Sin embargo, existe una falta de información sistemática y comparativa sobre las ventajas, desventajas y eficiencias de estos dos tipos de hornos en el contexto específico de la joyería cusqueña.

Los hornos de crisol a gas y los hornos de resistencia eléctrica presentan diferencias significativas en términos de consumo energético, tiempo de fusión, costos operativos y mantenimiento. Estas diferencias pueden impactar directamente en la competitividad y sostenibilidad de las joyerías locales, afectando su capacidad para producir productos de alta calidad de manera eficiente y rentable.

A pesar de la importancia de este tema, se ha observado una carencia de estudios que analicen de manera exhaustiva y comparativa estos aspectos tecnológicos en el contexto específico de las joyerías del Cusco. Esta falta de análisis detallado y riguroso limita la capacidad de los joyeros para tomar decisiones informadas sobre la elección del equipo más adecuado para sus necesidades particulares, lo que podría estar afectando negativamente su productividad y competitividad en el mercado.

Por lo tanto, se hace necesario realizar un análisis tecnológico comparativo entre los hornos de crisol a gas y los de resistencia eléctrica para la fusión de plata en las joyerías del Cusco. Este análisis debe abordar aspectos clave como eficiencia energética, costos operativos,

calidad del producto final, y factores de sostenibilidad y mantenimiento. Los resultados de este estudio no solo proporcionarán información valiosa para los joyeros locales, sino que también podrán servir como una base para futuras investigaciones y desarrollos tecnológicos en la industria de la joyería.

En resumen, la investigación busca responder a la siguiente pregunta central: ¿Cuál de las dos tecnologías de horno será más eficiente, para fundir aleaciones de plata en las joyerías de la región Cusco?

### **1.3. Formulación del problema objeto de investigación**

#### ***1.3.1. Problema General***

¿Cuál de las dos tecnologías de horno será más eficiente, para fundir aleaciones de plata en las joyerías de la región Cusco?

### **1.4. Problemas Específicos**

#### ***1.4.1. Problema Específico 1***

¿Cómo afecta el tiempo de fusión en la tecnológica de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica, durante el proceso de fundición de plata?

#### ***1.4.2. Problema Específico 2***

¿Cómo influye la temperatura de fusión en la tecnológica de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica, durante el proceso de fundición de la plata?

#### ***1.4.3. Problema Especifico 3***

¿Cómo afecta la pérdida de calor, dentro de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para fundir plata?

## **1.5. Justificación**

### ***1.5.1. Justificación Tecnológica***

La comparación y evaluación de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica desde una perspectiva tecnológica es esencial para identificar cuál de estos equipos ofrece mayor eficiencia y calidad en el proceso de fusión de plata. Al entender las ventajas y limitaciones de cada tipo de horno, se pueden promover innovaciones tecnológicas que optimicen los procesos de fabricación en las joyerías del Cusco. Además, esta investigación puede servir como base para futuras mejoras y adaptaciones tecnológicas en el ámbito de la joyería.

### ***1.5.2. Justificación Social***

La joyería es una actividad económica importante en el Cusco, no solo por su contribución al desarrollo económico, sino también por su valor cultural y artesanal. Mejorar los procesos de fusión de plata puede fortalecer a las joyerías locales, incrementando su competitividad y capacidad para crear empleo. Además, al promover prácticas más eficientes y sostenibles, se contribuye al desarrollo social y económico de la comunidad, mejorando la calidad de vida de los trabajadores y sus familias.

### ***1.5.3. Justificación Económica***

Desde un punto de vista económico, es crucial identificar cuál de los hornos proporciona un mayor rendimiento en términos de costos operativos y eficiencia energética. La reducción de

costos puede tener un impacto significativo en la rentabilidad de las joyerías locales. Al ofrecer datos concretos sobre los costos asociados a cada tipo de horno, los joyeros podrán tomar decisiones informadas que les permitan optimizar sus recursos y maximizar sus beneficios económicos.

#### ***1.5.4. Justificación Ambiental***

Evaluar el impacto ambiental de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica es fundamental para fomentar prácticas más sostenibles en la industria de la joyería. La reducción de emisiones y el uso eficiente de los recursos energéticos pueden disminuir la huella ambiental de las joyerías. Al identificar qué tipo de horno tiene un menor impacto ambiental, se puede promover el uso de tecnologías más ecológicas, contribuyendo así a la conservación del medio ambiente y al cumplimiento de normativas ambientales.

#### ***1.5.5. Limitaciones para la investigación***

El presente trabajo es de carácter comparativo entre estas dos tecnologías de fundición, por lo tanto, las limitaciones de esta investigación están basadas en el tipo de material a fundir y el tipo de fundición al que serán sometidas las pruebas para ambas tecnologías.

### **1.6. Objetivos**

#### ***1.6.1. Objetivo General***

Comparar y analizar cuál de las dos tecnologías de horno, es más eficiente y adecuada para la fusión de plata en las joyerías de la región del Cusco.

## **1.7. Objetivos Específicos**

### ***1.7.1. Objetivo Específico 1***

Analizar cómo el tiempo de fusión influye en la eficiencia a la tecnología de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica en el proceso de fundición de la plata.

### ***1.7.2. Objetivo Específico 2***

Evaluar cómo la temperatura del horno influye en la tecnología del horno de crisol a gas y de resistencia eléctrica para fundir plata.

### ***1.7.3. Objetivo Específico 3***

Determinar el efecto de la pérdida de calor dentro de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para fundir plata.

## **1.8. Hipótesis**

### ***1.8.1. Hipótesis general***

La tecnología del horno de crisol a gas es más eficiente y adecuada para la fusión de plata en las joyerías de la región del Cusco, en comparación con los hornos de resistencia eléctrica.

## **1.9. Hipótesis específica**

### ***1.9.1. Hipótesis específica 1***

El tiempo de fusión tiene un impacto diferencial dentro de la tecnología del horno, mostrando al horno de crisol con una mayor sensibilidad a las variaciones en el tiempo de fusión, en comparación con el horno de resistencia eléctrica.

### ***1.9.2. Hipótesis específica 2***

La temperatura de los dos hornos afecta de manera distinta en la fundición de plata, mostrando al horno de resistencia eléctrica con una mayor estabilidad y control de las temperaturas en comparación con el horno de crisol.

### ***1.9.3. Hipótesis específica 3***

La pérdida de calor afecta de manera significativa al proceso de fundición de plata en el horno de resistencia eléctrica, en comparación con los hornos de crisol a gas debido a la capacidad de retención de calor y diseño estructural que tiene dicho horno.

## **1.10. Variables**

### ***1.10.1. Variable Independientes***

- Tiempo de fusión
- Temperatura de fusión
- Pérdida de calor

### ***1.10.2. Variable dependiente***

- Eficiencia del horno

### ***1.10.3. Variable interviniente o externa***

- Temperatura del ambiente

- Masa del material de carga

## **1.11. Indicadores**

### ***1.11.1. Cálculo***

- Pérdida de calor en las paredes del horno (kW)
- Poder calorífico (kW)
- Resistencia mecánica de componentes de cada equipo

### ***1.11.2. Materiales***

- Plata piña 950
- Bórax
- Crisol cerámico de 1200 °C
- Ladrillo refractario

### ***1.11.3. Preparación de muestra***

- Peso del material a fundir

## CAPITULO II

### MARCO TEÓRICO

#### **2.1. Antecedentes de la Investigación**

##### ***2.1.1. Antecedentes Internacionales***

TOAPANTA RAMOS, Luis Fernando (2015), evaluó los parámetros del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy, su influencia para la mejora en la eficiencia del mismo. Basándose en un enfoque cualitativo y cuantitativo, y de alcance explicativo. Dicha investigación partió del estudio de la cantidad de energía necesaria para fundir 45 kg de aluminio, así como la determinación de la pérdida de energía por las paredes del horno de fundición y por el proceso de combustión. Así mismo, se determinó y se llegó a la conclusión de que la eficiencia térmica actual del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana es de 6.44 %, a pesar de ser baja está en los límites para este tipo de horno.

MORALES CEVALLOS, José Williams (2021), analizo las pérdidas de calor en el proceso de fundición del aluminio en el horno de crisol del Instituto Tecnológico Cotopaxi utilizando tipos de material refractario aislante. Siendo de enfoque cuantitativo de alcance explicativo de comparación. Dicha investigación consistió en analizar las pérdidas de calor en el proceso de fundición del aluminio utilizando dos hornos de diferente tipo de material refractario, estos hornos presentan dimensiones, capacidad y fuente calorífica igual. Por lo tanto, llego a la conclusión de que por medio del análisis comparativo entre los dos hornos de crisol se estableció de que para el primer horno se necesita un calor total 38.016 kW para la fusión de aluminio, esto por presentar una pérdida de calor de 27.136 kW, obteniendo un rendimiento del 42.97 %, mientras que el

segundo horno de crisol presenta una cantidad de 14.69 kW y una pérdida de calor de 30.461 kW, logrando un rendimiento alto de 80.16%.

### ***2.1.2. Antecedentes nacionales***

Pillaca, R. (2021). Diseño de un horno de crisol para la fundición de 600 kg de aluminio reciclado utilizando gas natural. Pontificia Universidad Católica del Perú, Facultad de Ingeniería Mecánica. Resumen: Se logró diseñar y construir un horno de fundición para metales blandos, se realizó el diseño con el software Inventor, así mismo se empleó gas licuado de petróleo para las fusiones ya que ofrece bajas emisiones de contaminantes.

Aquima, W. & Carlos, D.D. (2022). Diseño y construcción de un horno de crisol basculante a gas natural para fusión de aluminio, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Universidad San Antonio Abad del Cusco. Resumen: En esta investigación se determinó la cantidad de combustible para la fusión de 15 Kg de aluminio es 3.4 Kg de gas natural en un tiempo de fusión de 40 minutos.

Cabrera, D.E. & Morales J.M. (2019). Diseño y construcción de un horno crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre. Universidad Privada del Norte Cajamarca – Perú. Resumen: el presente trabajo de investigación, se puede concluir que el diseño y realizó la construcción del horno de crisol estacionario; logró elaborar una herramienta funcional con la característica de ser fácil de usar, funcional y económico.

Borda, D.R. (2006). Diseño y construcción de un horno de crisol utilizando GLP de la facultad de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – Perú. Resumen: En esta investigación se concluye que el horno GLP es eficiente y su grado de contaminación es muy bajo.

### **2.1.3. Antecedentes locales**

Antay, M. & Pfuro B. (2022). Diseño y construcción de un horno de crisol basculante para la fusión de aluminio para el laboratorio de fundición y moldeo de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Universidad San Antonio Abad del Cusco. Resumen: En esta investigación se determinó una eficiencia térmica del horno de crisol de 80,3 % mediante cálculos del balance de energía, con el uso de combustible GLP.

Huillca, R.B. & Huillca, R.G. (2022). Diseño y fabricación de un módulo de casting para joyería. Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Resumen: Se diseñó y fabricó un módulo de casting para joyería, que permite trabajar de manera eficiente a las condiciones ambientales de la ciudad del cusco. Este módulo fabricado resulta ser económico en comparación a los equipos casting procedentes de Lima o del exterior.

## **2.2. Fundamento Teórico**

### **2.2.1. Horno de Crisol**

El horno de crisol es una herramienta empleada principalmente para fundir metales no ferrosos. En este dispositivo, el metal a fundir se coloca dentro de un crisol hecho de grafito o carburo de silicio. Este crisol se sitúa dentro de una cámara de combustión cilíndrica, la cual está revestida internamente con un material refractario y exteriormente con una carcasa de chapa de acero.

El revestimiento refractario, comúnmente construido con ladrillos especiales, tiene como propósito resistir las altas temperaturas dentro de la cámara de combustión, mientras que la

carcasa proporciona soporte al conjunto. Es crucial que el interior de la cámara de combustión sea completamente cilíndrico para garantizar una distribución uniforme del calor.

### ***2.2.1.1. Tipos de Hornos de Crisol***

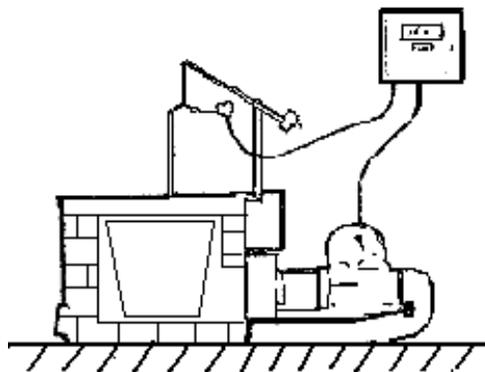
Existen diferentes tipos de hornos de crisol que se pueden definir de la siguiente manera:

#### **a) Hornos de pozo o de fosa**

Este tipo de horno puede ser construido tanto sobre como bajo el nivel del suelo, y en ambos casos permanece fijo. Se encuentran disponibles en una variedad de tamaños para adaptarse a crisoles que van desde los 15 hasta los 150 kg de capacidad para latón. Son altamente versátiles, tanto en lo que respecta a las aleaciones como a las cantidades de metal a fundir. Es posible utilizar crisoles diferentes para diversas aleaciones, e incluso, en cierta medida, se pueden emplear crisoles de distintos tamaños en un mismo horno, como se muestra en la Figura 1.

#### ***Figura 1.***

*Esquema de un horno de pozo*



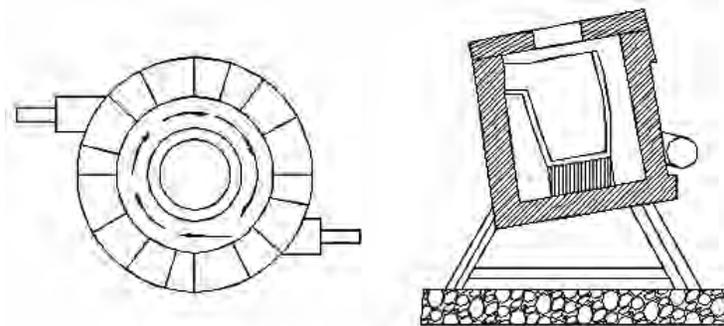
**Fuente:** Lamina, editorial Espasa.

## b) Hornos basculantes

Son hornos móviles soportados por un sistema de sustentación. Se utilizan comúnmente cuando se necesita producir cantidades relativamente grandes de una aleación específica. El metal se transfiere a los moldes utilizando una cuchara o un crisol precalentado, excepto en casos especiales donde se vierte directamente. El diseño original de horno basculante, con capacidades que van desde los 70 hasta los 750 kg de latón, bascula alrededor de un eje central, pero presenta la desventaja de que el punto de descarga se mueve junto con el basculamiento. Para resolver este problema, se desarrolló un tipo de horno basculante con eje en la piquera, con capacidad de 200 a 750 kg de latón, y el modelo más moderno es basculado mediante pistones hidráulicos, lo que proporciona un mayor control durante el vaciado.

**Figura 2.**

*Esquema de un Horno Basculante*



**Fuente:** Lamina, editorial Espasa.

## c) Hornos de Crisol Inmerso

Este tipo de horno opera de manera inversa al horno de crisol convencional, ya que la llama arde dentro del crisol sumergido en el baño de aleación de zinc o aluminio,

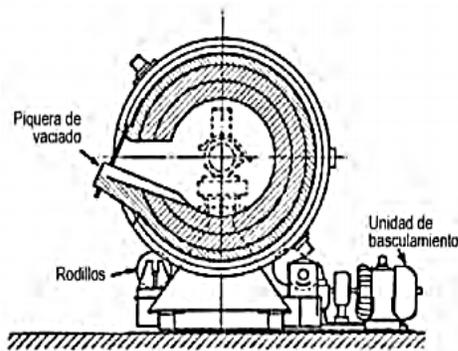
contenido en un recipiente refractario. Estos hornos están diseñados para fundir cantidades que van desde los 300 hasta los 1000 kg de aluminio por hora. Sus principales ventajas con respecto a los hornos de llama abierta incluyen una mayor eficiencia en la operación.

#### d) Horno Rotativo

Se utilizan para la recuperación de viruta, escoria y otros tipos de chatarra menuda. El horno contiene un crisol con forma de garrafa, con capacidad de 300 kg de limadura de latón y trabaja a un ángulo aproximado de  $50^\circ$  con respecto a la vertical. El cuerpo del horno y el crisol giran constantemente durante la fusión, trayendo el metal para el lado caliente del crisol y tirando la limadura no fundida hacia adentro y abajo del metal ya fundido.

#### *Figura 3.*

*Esquema de un horno rotativo de crisol*



**Fuente:** Carlos Calvo, Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas, 2010.

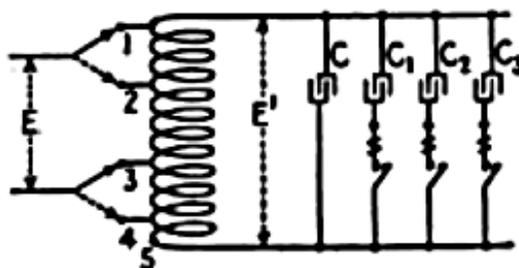
#### 2.2.2. Horno eléctrico

El horno eléctrico es un dispositivo diseñado para elevar la temperatura del material hasta su punto de fusión. Por lo general, estas resistencias están hechas de carburo de silicio. En la

figura .4 se presenta el esquema de conexión de un horno de inducción eléctrica. (Fink G. & Beaty, 2007).

**Figura 4.**

*Diagrama de un horno de resistencia eléctrica*



**Fuente:** Arnaldo N. Guesi, “Dimensionamiento de un horno eléctrico para tratamiento térmico de aceros”, 2019.

### 2.2.3. *Horno eléctrico de mufla*

El horno eléctrico de mufla es un equipo comúnmente empleado en entornos de laboratorio. Se ha diseñado específicamente para procedimientos en los que se necesite una exposición uniforme a temperaturas muy elevadas. Este tipo de horno se utiliza para tareas como calcinación, fundición y otros procesos de laboratorio que requieran el uso de un horno.

Las muflas son recintos cerrados de alta temperatura, fabricados con materiales refractarios aislantes que les permiten resistir sin deteriorarse el efecto de temperaturas elevadas.

Estas cámaras tienen la capacidad de alcanzar hasta los 1700°C y están equipadas con una abertura de visualización. La temperatura se incrementa de manera controlada y gradual a través de los dispositivos de regulación incorporados. En el caso de las muflas eléctricas, su temperatura máxima alcanza los 1000°C, si bien este valor puede variar según el modelo, tal como se muestra en la Figura 5.

**Figura 5.**

Imagen de un horno eléctrico de mufla.



**Fuente:** Horno Eléctrico de Mufla, Hornos del Valle S.A

### **2.2.3.1. Características del horno de mufla**

Para su funcionamiento del horno eléctrico de mufla es necesario conocer las partes que las conforman:

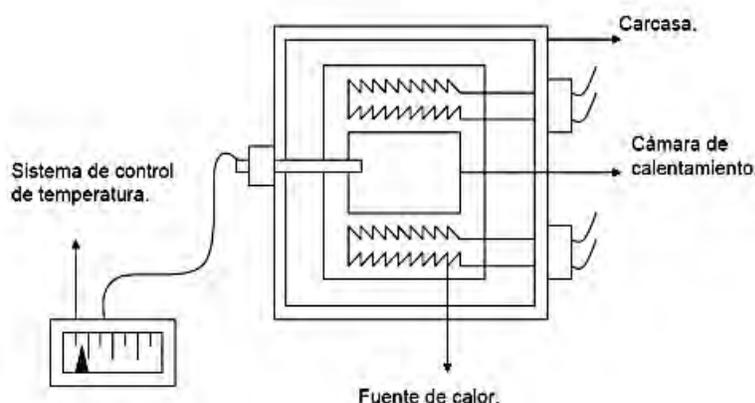
- **Cámara Interna:** Fabricada con aleaciones de aluminio y sílice para soportar las altas temperaturas, la parte superior de la cámara está equipada con una abertura que permite la salida de gases o la inserción de un termómetro para monitorizar la temperatura.
- **Elementos calefactores:** Estos elementos se sitúan en el interior de la cámara y tienen como propósito asegurar una distribución uniforme de la temperatura.
- **Termocupla:** Tiene un sensor que indica la temperatura a la que se encuentra la cámara.
- **Temporizador:** Para programar el tiempo de trabajo en el que operará la mufla.
- **Control de temperatura:** Sirve para programar la temperatura en la operara la mufla. Los controles analógicos tienen un margen de error más amplio.
- **Interruptor de seguridad:** Este se encuentra en la puerta que da acceso a la cámara; funciona cortando la alimentación de energía para que decrezca la temperatura.

### 2.2.3.2. Características de la resistencia del horno de mufla

Hornos eléctricos diseñados para su uso en laboratorios de prótesis dental y en la industria de joyería. Estos dispositivos pueden ser digitales o programables y están disponibles en diferentes configuraciones de cámara, como rectangular, ovalada o de tubo, con capacidad de ajuste de temperatura. La alimentación eléctrica puede variar, siendo posible encontrar opciones de 220 V, 380 V o 440 V, con frecuencia de 50/60 Hz y conexiones monofásicas o trifásicas, con rangos de potencia que van desde 2 kW/h hasta 150 kW/h. Además, ofrecen capacidades variables en litros y de carga, adaptándose así a las necesidades específicas de cada muestra o elemento a fundir, tal como se muestra en la figura 6.

**Figura 6.**

Partes constitutivas del horno de resistencia eléctrica.



**Fuente:** Arnaldo N. Guesi, "Dimensionamiento de un horno eléctrico para tratamiento térmico de aceros", pag. 54.

### 2.2.3.3. Parámetros eléctricos y consumo de energía en los hornos eléctricos

Los efectos de los parámetros eléctricos sobre consumo de energía o sobre las características de las resistencias (estabilidad y longitud son frecuentemente motivo de estudios.

Es necesario saber que, para identificar la potencia y consumo energético de un horno eléctrico, esto ira a depender directamente de los valores de tención, reactancia de circuito. Es necesario mencionar que para determinar estos datos se recurre a las siguientes expresiones y leyes:

#### **a. Potencia eléctrica**

La potencia eléctrica se defines como la rapidez con que un dispositivo que emplea energía eléctrica realiza un trabajo, también se interpreta como la energía que consume una maquina o cualquier dispositivo eléctrico en un segundo.

Con base a la ley de Ohm, la potencia eléctrica cuyo valor se calcula con la expresión  $P = VI$ , también se puede determinar con las expresiones:

$$P = I^2R \quad \text{y} \quad P = \frac{V^2}{R}$$

En donde la ley de Ohn señala que:

$$I = \frac{V}{R}$$

I = Intensidad de corriente

V = voltaje

R = Resistencia eléctrica

Joule = Watt. segundos (kWh)

#### **b. Consumo de la energía eléctrica**

La energía eléctrica se genera a partir de la diferencia de potencial eléctrico entre dos puntos específicos, conectados mediante un conductor eléctrico. Esta conexión produce una corriente eléctrica, la cual consiste en la transmisión de cargas negativas, comúnmente conocidas como electrones, hacia su punto de consumo.

La energía eléctrica generalmente se convierte posteriormente en otras formas de energía, como energética térmica, los cual determina con la siguiente expresión:

$$Q_s = E = I^2 x R x t$$

Donde:

$Q_s$  = consumo energético

$I$  = Intensidad de corriente

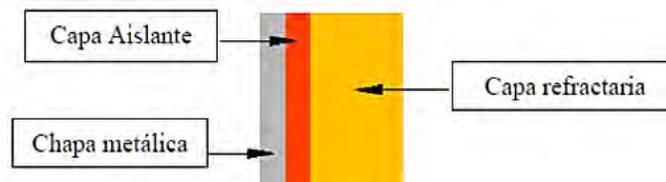
$T$  = Tiempo

#### 2.2.4. Estructura interna de los hornos

La estructura y los componentes internos del equipo están comprendidos dentro de la carcasa, que es una estructura metálica, y la cámara de calentamiento. Estos forman la estructura interna del horno, que consiste en una capa refractaria y una capa aislante, tal como se ilustra en la figura 7.

**Figura 7.**

*Esquema de conformación de los materiales refractarios*



**Fuente:** elaboración propia

#### 2.2.5. Materiales Refractarios

Son materiales compuestos no metálicos que pueden resistir altas temperaturas sin derretirse, ablandarse o descomponerse. Además, tienen una resistencia notable a la erosión,

abrasión, ataques químicos, impactos, gases corrosivos y cambios repentinos de temperatura, entre otros factores. (Harbison y Walker, 2005, p. 5)

### **2.2.5.1. Tipos de Refractarios**

Los materiales refractarios se clasifican de acuerdo con su carácter ácido, neutro y básico en función de la composición química de los óxidos y compuestos predominantes.

#### **a) Refractarios Ácidos**

Corresponde a la materia compuesta por sílice ( $\text{SiO}_2$ ), en forma libre o combinada y en diferentes proporciones (Harbison y Walker, 2005, p. 21)

Se clasifican en los siguientes tipos:

- Silícicos
- Silícicos - aluminosos
- Silícico – aluminosos con un tenor de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) entre 20 y 45%
- Silícicos – aluminosos con un tenor de alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) de entre un 55 y 100%
- Ladrillos de mullita
- Ladrillos de alúmina consolidados con fosfato
- Ladrillos de alúmina – cromo ladrillos de espinela

#### **b) Refractarios Neutros**

Entre los materiales más comunes empleados en las diferentes industrias están los refractarios de carburo de silicio, cromita, carbono – grafito y zircón (Harbison y Walker, 2005, p. 13).

### c) Refractarios Básicos

Los refractarios son materiales que se presentan alta resistencia a la corrosión debido a reacciones con escorias básica y acidas, entre ellos están los refractarios de dolomita y magnesita. (Harbison y Walker, 2005, p. 11).

#### 2.2.6. Ladrillos refractarios

Estos materiales pueden adoptar distintas formas y dimensiones según las necesidades específicas. Son fabricados mediante el proceso de extrusión y luego se someten a procesos de cocción para alcanzar la dureza necesaria. En la tabla 1 se presentan en detalle las propiedades de los ladrillos refractarios.

#### **Tabla 1.**

*Propiedades de los ladrillos refractarios.*

<b>Propiedades de los ladrillos refractarios</b>			
Refractariedad	Estabilidad volumétrica.	Resistencia a la compresión.	Estabilidad química.

**Fuente:** Tomado de Notas técnicas calidad de refractarios (p.39), por J. Bertini, 2017.

### a) Ladrillos de arcilla refractaria

Están compuestos principalmente por  $\text{SiO}_2$  y  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , denominados ladrillos silicoaluminosos. Estos son altamente adaptables y económicos en términos de adquisición, fundiéndose a una temperatura de aproximadamente  $1400\text{ }^\circ\text{C}$ . Son ampliamente usados en la construcción de hornos de fundición, su clasificación se puede apreciar en la tabla 2.

**Tabla 2.**

*Clasificación de ladrillos silicoaluminosos.*

<b>Clasificación de ladrillos silicoaluminosos.</b>	<b>% <i>SiO<sub>2</sub></i></b>	<b>% <i>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></i></b>	<b>% Otros Comp.</b>	<b>Densidad <i>g/cm<sup>3</sup></i></b>
<b>Super duty</b>	62	30	8	2.24
<b>Hight duty</b>	59	35	6	2.19
<b>Medium duty</b>	55	38	7	2.05
<b>Low duty</b>	52	39	9	2.00

**Fuente:** Tomado de notas técnicas calidad de refractarios (p.41), por J. Bertini.

- Súper duty, son reconocidos por su excepcional resistencia y calidad, ya que pueden tolerar condiciones de trabajo que alcanzan los 1300 °C. Estos ladrillos son altamente resistentes al desgaste, a la corrosión causada por escorias, gases y otros agentes químicos.
- High duty, son también ampliamente empleados por su buena densidad.
- Medium duty o mediano deber y Low duty o bajo deber. Son utilizados para revestimientos en temperaturas moderadas de 900 °C, así mismo tienen la capacidad resistir al ser sometidos a trabajos de temperaturas continuas.

## **b) Ladrillos de alta alúmina**

Estos ladrillos son conocidos como aluminosilicatos, ya que están principalmente compuestos de alúmina ( $Al_2O_3$ ), lo que proporciona al ladrillo refractario características superiores en comparación con los ladrillos silicoaluminosos. Un horno de fundición revestido internamente con este tipo de refractarios puede operar a temperaturas de hasta 1800 °C,

dependiendo del metal a fundir, y tienen un punto de fusión de alrededor de 2000 °C. En la tabla 3 se detalla la composición de los ladrillos refractarios aluminosilicatos y silicoaluminosos.

**Tabla 3.**

*Composición de ladrillos refractarios según su contenido de alúmina.*

Ladrillos Refractario		$Al_2O_3$	$SiO_2$	$Fe_2O_3$	CaO	MgO	$Na_2O$	$K_2O$	$TiO_2$	°C
<b>Alúmino.</b>	50	51.8	41.8	1.8	0.1	0.5	1.3	1.3	2.7	14000
	60	60.2	35.9	0.5	0.4	0.1	0.5	0.5	1.4	1500
	70	70.8	22.7	1.8	0.1	0.3	0.9	0.9	3.7	1700
	80 corindón	80.5	15.7	1.8	0.2	0.3	1.0	1.0	2.2	1800
<b>Sílico.</b>	<b>Super Duty</b>	30	62	1.5	0.3	0.3	0.9	0.2	2.0	1300
	<b>Hight Duty</b>	35	59	2.0	.3	0.3	0.9	0.2	1.6	1000
	<b>Low Duty</b>	39	52	6.0	0.3	0.1	0.5	0.5	1.6	900

**Fuente:** Tomado de notas técnicas calidad de refractarios (p. 47), por Bertini, 2017, <http://> Revista del Idiem.

### 2.2.7. Hormigones refractarios

Son materiales refractarios, compuestos por  $Al_2O_3$ ,  $SiO_3$ , CaO. Se utilizan para la junta de lados y vaciado, durante su aplicación sufren un fraguado ofreciendo condiciones de resistencia a

elevadas temperaturas. En la tabla 5, se muestra la composición química de los hormigones refractarios y su temperatura de trabajo, se clasifican en:

**a) Mortero refractario**

Contienen de 40 a 81 % de alúmina y son empleados para sellar las juntas entre los ladrillos refractarios, son empleados para trabajos exigentes en la industria siderúrgica.

**b) Cemento refractario**

Este material contiene entre 45 a 90 % de alúmina, según la tabla 4, son empleados para vaciados donde posteriormente sentarían los crisoles o ladrillos refractarios.

**Tabla 4.**

*Composición química de los hormigones refractarios.*

<b>Temperatura de uso °C</b>	<b>% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub></b>	<b>% CaO</b>	<b>% Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> + FeO</b>
1350	40 - 42	38 - 39	12 - 13
1600	60 - 62	27	2 - 3
1700	70 - 72	26 - 27	0.1 - 0.2
1850	78 - 81	17 - 19	0.1 - 0.2

**Fuente:** Tomado de Tratamientos y valoración energética de residuos (p.33), por Castells, 2017, Pearson educación.

**2.2.8. Aislantes térmicos**

Los aislantes térmicos, se caracterizan por su baja conductividad térmica, existen distintos tipos de aislantes térmicos para diferentes aplicaciones tales como fibra de vidrio, fibra

de mineral, fibra de cerámica, etc. Estos materiales, se emplean para reducir el flujo de calor al exterior y cabe resaltar que a mayor espesor de aislante térmico menor será el flujo de calor, pero el costo de inversión será mayor.

**a) Fibra de cerámica**

Debido a su asequibilidad y flexibilidad para diversas aplicaciones, estos materiales son ampliamente utilizados. Ofrecen propiedades térmicas significativas, como una baja conductividad térmica de  $0.2 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  y una resistencia a la tensión notable. Su temperatura máxima de funcionamiento es de  $1260 \text{ }^\circ\text{C}$ .

**b) Fibra de vidrio**

Se obtiene a partir de vidrio por centrifugación, lo que le confiere una excepcionalmente baja conductividad térmica de  $0.02 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ , convirtiéndolo en un aislante térmico excelente y muy liviano. Puede operar a temperaturas de hasta aproximadamente  $1500 \text{ }^\circ\text{C}$ . Es importante destacar que se debe posicionar después del material refractario y nunca debe estar en contacto directo con la llama generada por la combustión.

**c) Fibra mineral**

Conocida también como lana mineral, este material se elabora a partir de basalto y otros componentes, y se utiliza también en la segunda capa. Es resistente al ataque de ácidos y gases, y puede operar a temperaturas de hasta  $1700 \text{ }^\circ\text{C}$ , con una conductividad térmica de  $0.01 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

. Las carcasas metálicas para hornos de fundición, por otro lado, son revestimientos o estructuras metálicas diseñadas para proteger a los materiales refractarios alta.

#### **d) Aceros termorresistentes**

Se caracterizan por ser de tipo austenítico, es decir, su proceso de austenización comienza a 723 °C, disolviendo el carbono en el hierro gamma en un rango del 0.8 % al 1.76 %, y concluye a los 1125 °C. Por esta razón, para estabilizar la fase gamma, es necesario que la presencia de elementos como cromo y níquel esté por encima del 18 % y el 8 % respectivamente.

Se muestra también las propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 310 en la tabla 5.

**Tabla 5.**

*Propiedades mecánicas del acero inoxidable AISI 310.*

<b>Temperatura de Prueba °C</b>	<b>Punto de Cedencia MPa</b>	<b>Resistencia a la Tensión MPa</b>
66	290	621
204	241	552
538	166	455
649	152	379

**Fuente:** Tomado de Propiedades del acero Inox AISI 310 (p.3), Sandmeyer Steel Company, 2021,

<https://dtesteel.com>

### 2.2.9. Generalidades de la combustión

La combustión es un proceso químico que libera energía al combinarse combustible, oxígeno o comburente, y energía de activación. Los combustibles pueden ser sólidos, líquidos o gaseosos, y varían en su poder calorífico, como se muestra en la tabla 6. Sin embargo, su aplicación puede estar limitada por factores como su poder calorífico, disponibilidad y costos. En la industria siderúrgica, el coque siderúrgico se utiliza como fuente de energía para fundir el hierro en altos hornos, aunque cada vez más se están empleando en los hornos eléctricos debido a su eficiencia térmica, lo que permite tiempos de fusión en cuestión de segundos.

**Tabla 6.**

*Poder calorífico de combustibles industriales.*

<b>Combustibles</b>	<b>Kcal/kg</b>	<b>BTU/lb</b>
Hidrógeno	33.9	60.9
Lignito	13.2	23.74
Gas Natural	13.0	23.3
GLP	11.9	21.4
Gasolina	11.3	20.3
Diésel	10.7	19.24
Carbón	7.8	4.33
Etanol	7.1	3.9
Madera	3.6	2.0

**Fuente:** Tomado de Gas natural propiedades y uso (p.27), por J. H.Viloche, 2019.

<https://www.ipeperu.net>

**a) Combustibles sólidos**

En la industria siderúrgica, específicamente en la producción de acero, se utiliza coque siderúrgico como combustible. Este material tiene un poder calorífico de 7.648 kcal/kg.

**b) Combustibles líquidos**

El combustible líquido más utilizado en la fundición es el diésel, también conocido simplemente como petróleo, que tiene un poder calorífico de 10.700 kcal/kg. Sin embargo, la combustión de petróleo produce una cantidad excesiva de humos, lo que afecta al medio ambiente.

**c) Combustibles gaseosos**

Una opción adicional como fuente de energía para las fundiciones es el gas licuado de petróleo, conocido como GLP, compuesto principalmente por propano, butano y otros componentes. Se puede almacenar fácilmente en forma líquida en depósitos como tanques o cilindros, donde el gas se encuentra comprimido, ocupando un menor volumen, pero con mayor densidad. El poder calorífico del GLP es de 11900 kcal/kg.

**2.2.10. Quemadores**

Los quemadores tienen la función de combinar el combustible con el comburente para producir una combustión controlada y constante. Además, están equipados con un motor eléctrico, generalmente trifásico, que convierte la energía eléctrica trifásica en energía mecánica. Estos motores tienen diversas capacidades, desde fracciones de caballo hasta varios miles de

caballos de fuerza (HP), y su eficiencia suele ser alta, típicamente alrededor del 75 %. Los quemadores automáticos están equipados con un ventilador que genera turbulencias de aire significativas y tienen la capacidad de mezclar de manera óptima el aire y el combustible, como se muestra en la figura 8, lo que permite alcanzar la cantidad de calor deseada y facilita su control.

***Figura 8.***

*Quemador manual con ventilación eléctrica*



**Fuente:** Tomado de quemadores occidente, [https://www.quemadoresdeoccidente.com/Quemador-Manual-Mixto-Modelo-24,47\\_1680640138](https://www.quemadoresdeoccidente.com/Quemador-Manual-Mixto-Modelo-24,47_1680640138)

### ***2.2.11. Conservación de calor dentro del horno***

Cuando nos referimos a la conservación del calor dentro del horno, estamos hablando de un aspecto económico, ya que a medida que el horno es más efectivo en retener el calor gracias a sus aislamientos, el consumo de combustible disminuye y el tiempo de calentamiento se reduce. Por lo tanto, se reduce significativamente el gasto en energía, que suele ser uno de los mayores costos operativos de un horno.

Para determinar las potenciales pérdidas de calor en un horno es primordial definir en qué momento ocurren esas pérdidas. Para ayudarnos a encontrarlas, se dividirá la operación del horno en etapas de calentamiento, las cuales pueden ser:

- 1) **Etapa de precalentamiento:** El horno empieza a calentarse hasta la temperatura de trabajo; en este momento el mayor consumo energético es empleado para calentar el recubrimiento refractario.
- 2) **Etapa de operación:** En esta etapa, la mayor parte del consumo energético se destina a la fusión de la carga. La cantidad de combustible utilizada en esta etapa variará según el tipo de metal a fundir y las pérdidas de calor del horno a través de sus paredes.
- 3) **Etapa de mantenimiento:** En este punto, el horno ha completado la fusión de la carga y la energía se emplea para mantener el baño mientras se inicia el proceso de colado. El consumo de combustible se reduce y debe ser suficiente para mantener una temperatura estable.
- 4) **Etapa de enfriamiento:** Una vez que el horno ha completado su ciclo de funcionamiento, se apaga y el calor se disipa a una velocidad determinada por el revestimiento del horno y las condiciones ambientales circundantes.

Dentro de estas etapas, las pérdidas de calor al exterior se dan por diversos factores, dentro de los cuales encontramos:

- a) **Pérdidas en los gases de combustión:** Una parte de la energía aún permanece en los gases de combustión al salir por la chimenea. Esta pérdida también se llama pérdida por gases de escape.
- b) **Pérdida por humedad en el combustible:** El combustible contiene, usualmente, un poco de humedad y una pequeña parte de la energía es utilizada para evaporar esa humedad como también la humedad dentro del horno.

- c) **Pérdidas por hidrogeno en el combustible:** En la reacción de combustión parte de la energía es empleada para que el hidrogeno pueda dar paso a la formación de agua.
- d) **Pérdidas a través de aberturas en el horno:** Las pérdidas de calor por radiación más significativas suceden cuando existen aberturas al ambiente en el horno, especialmente para hornos que trabajan a temperaturas mayores de 540°C. Otras pérdidas son debidas a la infiltración de aire debido al arrastre de los gases de escape hacia la atmosfera, lo que genera una presión negativa dentro del horno y por ende fomenta el ingreso de aire frío del exterior a través de ranuras o cuando la puerta del horno es abierta.
- e) **Pérdidas a través de las paredes:** La transferencia de calor por las paredes resulta ser una substancial pérdida de combustible si no es considerada apropiadamente. Las extensiones de las pérdidas dependen de:
- **Emisividad de las paredes.** El ladrillo refractario posee un alto valor de emisividad (0.9-0.95), esto quiere decir que refleja muy poco la radiación y por lo tanto tiende a absorber la energía radiante y almacenarla para posteriormente radiarla en todas direcciones al incrementarse la temperatura. Por ello es que en la etapa de precalentamiento la mayor parte del combustible es empleado para calentar el ladrillo hasta la temperatura de operación.
  - **Conductividad del refractario.** La conductividad térmica de las paredes es un parámetro importante a considerar. Entre mayor sea la conductividad, mayor será la pérdida de calor al ambiente.
  - **Espesor de la pared.** Si la pared del refractario es delgada, el recorrido del calor a través de esta es más corto y por lo tanto hay un mayor flujo de calor al ambiente.

- **Velocidad y temperatura del aire.** La transferencia de calor se ve favorecida con un flujo de aire turbulento característico de altas velocidades de flujo de aire y por los gradientes de temperatura existente entre el exterior del horno y el aire circundante.
- **Si el horno es operado de manera continua o intermitente.** Un horno operado de manera continua posee ciclos de trabajo largos, en donde las mayores pérdidas de calor se dan en las etapas de operación y mantenimiento, mientras que en un horno intermitente la mayor pérdida de calor se da en la etapa de enfriamiento y por ende el mayor consumo de combustible se da por calentar el horno en frío hasta la temperatura de operación.

### ***2.2.12. Transferencia de calor***

#### ***2.2.12.1. Mecanismos de transferencia de calor***

La transferencia de calor puede definirse como la transmisión de energía de una región a otra, resultando de la diferencia de temperatura existentes entre ellas. Esto es expresado en la siguiente ecuación:

$$Q = C_e \cdot m \cdot \Delta T$$

Donde:

Q = Calor (kW)

C<sub>e</sub> = Calor específico

m = Masa (Kg)

ΔT = Variación de la temperatura (°T)

Generalmente, se considera tres formas distintas de transmisión de calor por conducción, radiación y convección.

Hablando en términos estrictos, solo la conducción y la radiación deberían considerarse como procesos de transferencia de calor, ya que solo estos dos mecanismos requieren una diferencia de temperatura para su funcionamiento.

La convección no se ajusta completamente a la definición de transferencia de calor, ya que para su funcionamiento también implica el transporte mecánico de masa. El calor, como una forma de energía, puede ser transferido de un sistema a otro siempre que exista una diferencia de temperatura, y este proceso se completa cuando se alcanza el equilibrio térmico.

La transferencia de esta energía, se da 3 modos diferentes, estas son:

**a) Conducción:**

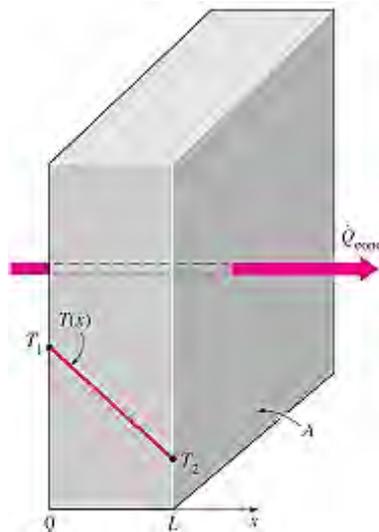
La transferencia de calor por conducción ocurre cuando las moléculas con mayor energía se mueven hacia las de menor energía a través de un medio (Fig. 9). La velocidad de conducción de calor está influenciada por la forma, el grosor y el tipo de medio utilizado. Además, las propiedades como el calor específico y la conductividad térmica determinan la idoneidad de un material para aplicaciones específicas.

En la transferencia de calor por conducción, la ecuación o modelo que posibilita cuantificar este proceso de transferencia de calor se le conoce como LEY DE FOURIER, ecuación 1:

**Ecuación 1**

$$Q_{cond} = -KA \frac{dT}{dx}$$

- **K** = Coeficiente de conductividad térmica del material
- **A** = área perpendicular a la dirección de transferencia de calor
- **dT/dx** = Gradiente de temperatura
- **L** = Capa plana del espesor

**Figura 9.***Transferencia de Calor por Conducción Unidimensional*

**Fuente:** Yunus A. Cengel, Transferencia de calor

La trasmisión de calor por conducción en los hornos industriales tiene lugar al dejar un material frío sobre una solera o crisol caliente. Si están en contacto dos piezas de un material sólido (no separados por una capa de aire u otro fluido), las superficies de contacto logran instantáneamente la misma temperatura, el cual se encuentra en el rango de temperaturas de los dos materiales en contacto. La rapidez de conducción de calor a través de una pared o capa plana es equitativa a la diferencia de temperatura a través de esta y al

área de transferencia de calor, sin embargo, es 50 inversamente proporcional al espesor de capa (Cengel, 2007, p 18), se determina usando la ecuación 2:

***Ecuación 2***

$$Q = K \cdot A \frac{(t_1 - t_2)}{\Delta x} = -K \cdot A \frac{\Delta T}{\Delta x}$$

Donde

- **Q:** Rapidez de transferencia de calor
- **K:** Conductividad térmica del material
- **A:** Área de transferencia de calor
- **T1-T2:** Diferencia de temperatura uno a otro lado de la pared.

El signo negativo de la ecuación anterior asegura que el cumplimiento del segundo principio de la termodinámica, es decir que el calor tendrá que fluir hacia abajo en la jerarquía de la temperatura (Holman, 1999, p 18).

La conducción de calor a través de un cuerpo cilíndrico, de radio interior  $r_1$ , radio exterior  $r_2$ , longitud  $L$  y conductividad térmica  $K$  se muestra en la Figura 11. Las dos superficies de la capa cilíndrica se conservan a las temperaturas constantes  $t_1$  y  $t_2$ . No hay producción de calor en la capa y la conductividad térmica se mantiene” (Cengel, 2007, p 150). Entonces la transferencia por conducción a través de cuerpos cilíndricos se puede determinar mediante la ecuación:

***Ecuación 3***

$$Q = 2\pi LK \frac{t_1 - t_2}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}$$

La resistencia térmica de la capa cilíndrica en oposición a la conducción de calor o, sencillamente la resistencia a la conducción se determina mediante la ecuación (Cengel, 2007, p 151).

**Ecuación 4**

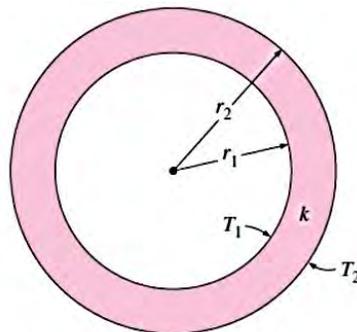
$$R_{ter} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot L \cdot K}$$

Donde:

- $R_{ter}$ : Resistencia térmica.
- $K$ : Conductividad térmica del material.
- $L$ : Longitud de la capa cilíndrica.
- $r_1$  y  $r_2$ : Radios interior y exterior de la capa cilíndrica (Fig. 10)

**Figura 10.**

*Tubo cilíndrico con temperaturas de superficie interior y exterior.*



**Fuente:** Tomado de transferencia de calor, (p 150, por Y. Cengel, (2007)

El concepto de resistencia térmica puede emplearse con paredes cilíndricas multicapa de del mismo modo que en las paredes planas” (Holman, 1999, p 46). Para el

sistema de tres capas que se muestra en la figura 12 la resistencia térmica, se determina mediante el uso de la ecuación 5.

**Ecuación 5**

$$Q = \frac{2\pi.L(t_1-t_4)}{\frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{kA} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{kB} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{kC}}$$

**b) Convección:**

La convección es la forma de transferencia de energía que tiene lugar entre una superficie sólida y el líquido o gas contiguo que están en movimiento y abarca los efectos combinados de la conducción y el movimiento de fluidos. Entre más veloz sea el movimiento de un fluido, mayor es la transferencia de calor por convección (Cengel, 2007, p 25). Cuando no existe algún movimiento masivo de fluido la transferencia de calor entre una superficie sólida y el fluido contiguo es por conducción pura.

La existencia del movimiento masivo del fluido aumenta la transferencia de calor entre la superficie sólida y el fluido, aunque entorpece la determinación de la rapidez de transferencia.

Pese a la dificultad de la convección, se contempla que la rapidez de transferencia de calor por convección es igual a la diferencia de temperatura y se expresa por la ley de Enfriamiento de Newton como se muestra en la ecuación 6:

**Ecuación 6**

$$Q_{conv} = hA_s(T_s - T_\infty)$$

Dónde:

- **h**: Coeficiente de transferencia de calor por convección  $W/m^2 \text{ } ^\circ C$
- **$A_s$**  : Área superficial a través de la cual tiene lugar la convección,  $m^2$ .
- **$T_s$**  : Temperatura de la superficie,  $^\circ C$
- **$T_\infty$**  : Temperatura del fluido,  $^\circ C$

Para que ocurra convección, se requiere de 2 medios, un cuerpo sólido y un fluido como el gas. Así mismo, los tipos de convección pueden forzadas o natural. En la convección forzada, el fluido o aire, es forzado a fluir sobre una superficie mediante agentes externos como un ventilador. En tanto la convección natural, se genera en condiciones normal, sin ningún agente externo.

- **Convección externa forzada**

Un fluido gaseoso o líquido que fluye por la parte externa de un cuerpo sólido, este ofrece resistencia al paso del fluido siendo por fricción ya que el fluido al ser inducido forzosamente, este ejerce fuerzas cortantes y tangenciales. Si el fluido no es forzado, este ejerce fuerzas perpendiculares. Para determinar si el flujo es turbulento o laminar, el número de Reynolds es quien la caracteriza, para un número de  $Re < 2 \times 10^5$  se considera laminar y se convierte turbulento si  $Re \geq 2 \times 10^5$ . La ecuación del número de Reynolds se expresa como:

***Ecuación 7***

$$Re = VD v = \rho VD \mu$$

Donde D, es el diámetro del cuerpo cilíndrico, V es la velocidad del fluido,  $v$  es la viscosidad cinemática,  $\mu$  es la viscosidad dinámica y  $\rho$  es la densidad del fluido.

Si bien, se mencionó que la parte externa del sólido ofrece cierta resistencia al paso del fluido, esta resistencia se denota por CD o coeficiente de resistencia al movimiento. Por otra parte, los fenómenos la resistencia al movimiento, interfieren el flujo de calor reduciéndola, y este efecto es denotado por el número de Nusselt, y se expresa en la siguiente ecuación 8:

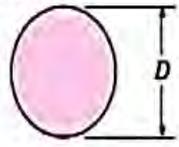
**Ecuación 8**

$$Nu = hDk = CRe^mPr^n$$

Donde Pr, es el número de Prandtl, que viene la rapidez en la que se propaga el flujo de calor por acción del fluido. Así mismo,  $n = 1/3$  y las constantes C y m, pueden ser determinados empleando la siguiente figura 11.

**Figura 11.**

*Correlaciones empíricas para el número de Nusselt.*

Sección transversal del cilindro	Fluido	Rango de Re	Número de Nusselt
<p>Círculo</p> 	Gas o líquido	0.4-4	$Nu = 0.989Re^{0.330} Pr^{1/3}$
		4-40	$Nu = 0.911Re^{0.385} Pr^{1/3}$
		40-4 000	$Nu = 0.683Re^{0.466} Pr^{1/3}$
		4 000-40 000	$Nu = 0.193Re^{0.618} Pr^{1/3}$
		40 000-400 000	$Nu = 0.027Re^{0.805} Pr^{1/3}$

**Fuente:** Tomado de Transferencia de calor y masa (p. 114), por Y. A. Cengel, 2007, McGraw-Hill.

Así mismo, todo cuerpo sólido como ya se indicó, ofrece cierta resistencia al flujo de calor R, estas resistencias, se pueden expresar en las siguientes ecuaciones, tanto para flujo de calor por conducción y flujo de calor por convección.

- ✓ Resistencia térmica por convección:

***Ecuación 9***

$$R_{conv} = \frac{1}{hA} \frac{^{\circ}C}{W}$$

- ✓ Resistencia térmica por conducción:

***Ecuación 10***

$$R_{conv} = \frac{\ln\left(\frac{r_1}{r_2}\right)}{2\pi kL} \frac{^{\circ}C}{W}$$

- ***Convección interna forzada***

El flujo laminar o turbulento por convección interna en cuerpos cilíndricos, es denotado también por el número de Reynolds, ecuación 8.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

Donde:

- **V** = es la velocidad del fluido.
- **D** = es el diámetro del cuerpo cilíndrico.
- **$\nu = \mu/\rho$**  es la viscosidad cinemática del fluido.

Para un flujo laminar en cuerpos cilíndricos, el número de  $Re \leq 2300$  y para flujos turbulentos  $Re > 10000$ . Para flujos laminares, la fricción en interior del cuerpo cilíndrico, ofrece resistencia al pazo del fluido, denotado como factor de fricción, cuya ecuación es la siguiente 11:

***Ecuación 11***

$$f = \frac{64}{Re}$$

El número de Nusselt para convección interna forzada, se expresa en la siguiente ecuación 12:

$$Nu = hDk = 3.66 + 0.065 \left(\frac{D}{L}\right) Re Pr^{1/4} + 0.04 \left(\left(\frac{D}{L}\right) Re Pr\right)^{2/3}$$

**Ecuación 12**

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

Donde D, es el diámetro del cilíndrico y L es la longitud del cuerpo cilíndrico. Por otra parte, el factor de fricción para un flujo turbulento, depende del número de (Re) y de la aspereza relativa  $\varepsilon/D$ . Con el diagrama de Moody, se puede determinar directamente el factor de fricción, ya que este diagrama relaciona el número de Reynolds y a la aspereza relativa del cuerpo cilíndrico. El número de Nusselt para convección interna forzada incluida en factor fricción, esta denotado por la siguiente ecuación 13:

**Ecuación 13**

$$Nu = (f/8)(Re-1000)Pr^{1/4} + 12.7(f/8)^{1/4} Pr^{1/4} (0.5 \leq Pr \leq 2000) \text{ y } (3 \times 10^3 < Pr < 5 \times 10^6)$$

Convección natural Como ya se había indicado, en una convección natural el movimiento del fluido ocurre sin ningún esfuerzo, a comparación de la convección forzada, el movimiento del fluido es turbulento y es desplazado en cierta dirección.

La velocidad del fluido en una convección natural, por lo general son menores a 1 m/s, por lo tanto, el coeficiente de transferencia de calor por convección natural suele ser mucho menor que el coeficiente de transferencia de calor por convección forzada. Por otra parte, en la convección natural, el número de Grashof, representa la razón entre la fuerza de flotación y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido y se expresa en la siguiente ecuación 14:

***Ecuación 14***

$$Gr = g\beta(T_s - T_\infty)L^3/\nu^2$$

Donde:

- $g$ = Aceleración gravitacional, m/s<sup>2</sup>
- $\beta$ = Coeficiente de expansión volumétrica, 1/K ( $\beta = 1/T$ )
- $T_s$ = Temperatura de la superficie, °C
- $T_\infty$ = Temperatura del fluido, °C
- $L$ = Longitud característica de la configuración geométrica, m
- $\nu^2$ = Viscosidad cinemática del fluido, m<sup>2</sup>/s

El número de Nusselt en una convección natural, puede ser expresado por la siguiente ecuación:

$$Nu = hL/k = C(GrPr)^n = C(Ra)^n$$

Donde Ra, es el número de Rayleigh el cual, es el producto de los números adimensionales entre Grashof ( $Gr$ ) y Prandtl ( $Pr$ ), el valor de  $n$  normalmente es 1/4 para un flujo laminar y 1/3 para un flujo turbulento y  $C$ , es una constante

normalmente menor a 1. Otra forma de expresar el número de Rayleigh, es mediante la siguiente ecuación 15:

$$Ra = GrPr = g\beta(T_s - T_\infty)v2L^3Pr$$

***Ecuación 15***

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L^3}{V \cdot \alpha}$$

Por tanto, para fines de cálculo las propiedades del fluido se evalúan a la temperatura de película siendo la ecuación 16.

***Ecuación 16***

$$T_f = \frac{T_s - T_\infty}{2}$$

Donde  $T_s$  y  $T_\infty$ , son las temperaturas de superficie del sólido y temperatura del fluido respectivamente. Por consiguiente, para determinar el coeficiente de transferencia de calor con convección natural se puede lograr con la siguiente ecuación:

***Ecuación 17***

$$Q_{conv} = hA(T_s - T_\infty)$$

### **c) Radiación:**

Es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones. A diferencia de la conducción y convección, este no requiere de algún medio, se puede propagar en el vacío y a una velocidad cercana a la de la luz. Todos los cuerpos o materiales, emiten cierta cantidad de radiación y esta, la determina la propiedad de

emisividad de un cuerpo, cuyo valor está en el intervalo de  $0 \leq \varepsilon \leq 1$ . Las propiedades que determinan la radiación, son la absorptividad y emisividad. Un cuerpo negro, por excelencia, es un absorbedor y emisor de fotones. La emisividad ( $\varepsilon$ ) y absorptividad ( $\alpha$ ), dependen de la temperatura y de la longitud de onda de la radiación. Por otra parte, no puede ocurrir simultáneamente los 3 mecanismos de transferencia de calor, más si podría ocurrir, la combinación de conducción y radiación, pero no convección, o la combinación de radiación y convección. A diferencia de la conducción y convección, la transferencia de energía por radiación no necesita la existencia de un medio interpuesto, ya que la materia emite radiación en forma de ondas electromagnéticas o fotones, como consecuencia de los cambios en la configuración electrónica de los átomos. De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida y no sufre mitigación en el vacío. “En el estudio de transferencia de calor por radiación térmica es importante resaltar que todos los cuerpos a una temperatura arriba del cero absoluto emiten radiación térmica” (Cengel, 2007, p 27). Todos los sólidos, líquidos y gases generan, absorben o transmiten radiación en distintos grados “Cuando una superficie de emisividad  $\varepsilon$  y área superficial  $A_s$  que se halla a una temperatura superficial  $T_s$  que está completamente contenida por una superficie mucho mayor que se encuentra a la temperatura absoluta  $T_{alred}$ , y separada por un gas (como el aire) que no participa en la radiación” (Cengel, 2007, p 29).

La rapidez de la transferencia de calor por radiación es igual a la cuarta potencia de la temperatura absoluta del cuerpo, cuando dos superficies intercambian calor por radiación, el intercambio de calor neto es equivalente a las diferencias de T como se expresa en la ecuación 18.

**Ecuación 18**

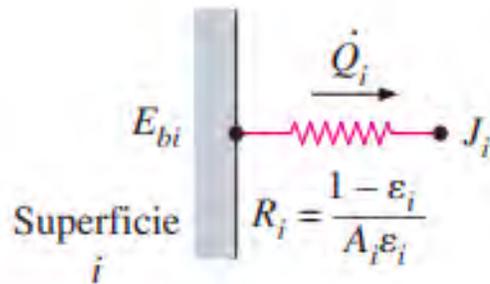
$$Q_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4)$$

Dónde:

- $\sigma$ : La constante de Stefan-Boltzmann
- $\epsilon$ : Superficie de emisividad
- $A_s$ : Área superficial
- $T_s$ : Temperatura de la superficie
- $T_{alred}$ : Temperatura de superficie circundante

**Figura 12.**

*Analogía de la resistencia superficial a la radiación.*



**Fuente:** Tomado de Transferencia de calor y masa (p. 728), por Y. A. Cengel, 2007, McGraw-Hill.

### 2.2.13. Balance Energético:

#### 2.2.13.1. Generalidades:

El balance energético de un horno difiere significativamente entre un horno continuo y uno intermitente. En los hornos continuos, se considera la producción en términos de kg/h o Tn/h, mientras que, en los intermitentes, lo más relevante es la carga introducida en cada ciclo, expresada en kg o Tn.

El balance térmico es una herramienta muy valiosa para todos los tipos de hornos. Se emplea en el diseño de hornos y procesos, en el cálculo del combustible necesario, en la evaluación de la eficiencia de los hornos y en un análisis térmico exhaustivo de los procesos. El balance térmico del sistema se describe como se muestra en la ecuación 19:

*Ecuación 19*

$$Q_{total} = Q_p + Q_{fund}$$

**Ingreso de Calor = Salida de Calor + Acumulación de Calor**

### **2.2.13.2. Componentes Básicos del Balance Energético**

Entre los componentes de un balance energético se distinguen los que generan aportación de calor al proceso y los que absorben calor del sistema.

#### **a) Aportación de Calor**

Esto ocurre al emplear energía eléctrica para calentar el horno; si se optara por otro medio de calentamiento, la regulación de la temperatura no sería tan sencilla. En los hornos equipados con ventiladores de recirculación, es importante considerar la energía aportada por estos ventiladores al interior del horno. Esta energía se absorbe en el eje del ventilador y se convierte completamente en calor, pero disminuye considerablemente a medida que aumenta la temperatura del horno.

#### **b) Absorción de calor**

- Calor útil requerido para calentar y/o fundir la carga.

- Calor perdido por la escoria. Debe tenerse en cuenta sobre todo en los hornos de fusión.
- Calor a contenedores y soportes de carga.
- Calor de reacciones endotérmicas. Es tipo de los hornos de calcinación y de fusión.
- Pérdidas de calor por conducción a través de las paredes
- Pérdidas de calor por aberturas
- Pérdidas de calor por el agua de refrigeración
- Pérdidas del calor acumulado en el revestimiento.
- Pérdidas de calor incontroladas o que resultan imposibles de medición.

### **2.2.13.3. Rendimiento térmico del horno**

El rendimiento, tanto en el ámbito físico como en el tecnológico, también conocido como eficiencia energética de un dispositivo, horno, máquina, ciclo termodinámico, etc., se define como la relación entre el calor total absorbido y el calor total entregado generado por la combustión del combustible (PCI), que incluye el calor sensible del combustible, el aire y el medio de atomización. Esto se expresa como un porcentaje como se muestra en la ecuación 20.

***Ecuación 20***

$$\eta = \frac{Q_s - Q_{TOTAL}}{Q_s} \cdot 100\%$$

### **2.2.14. La plata (Ag)**

La plata es un elemento químico de número atómico 47 situación en el grupo 1b de la tabla periódica de los elementos. Su símbolo es Ag (procede del latín: Argentum). Es un metal de

transición blanco, brillante, blanco, dúctil, maleable y es mejor conducción metálico del calor y la electricidad.

#### **2.2.14.1.      *Aplicaciones***

La producción mundial de plata, aproximadamente el 70% se usa con fines monetarios, buena parte de este metal se emplea en orfebrería, y en menores cantidades en la industria fotográfica, química y eléctrica.

Algunos usos de la plata se describen a continuación:

- Fotografía. Por su sensibilidad a la luz (especialmente el bromuro y el yoduro, así como el fosfato). El yoduro de plata se ha utilizado también para producir lluvia artificial.
- Medicina. Por su elevado índice de toxicidad, sólo es aplicable en uso externo. Un ejemplo es el nitrato de plata, utilizado para eliminar las verrugas. (Esta información contradice la que contiene la página en inglés sobre el mismo elemento).
- Electricidad. Los contactos de generadores eléctricos de locomotoras de ferrocarril Diesel eléctricas llevan contactos (de aprox. 1 in. de espesor) de plata pura; y esas máquinas tienen un motor eléctrico en cada rueda o eje.
- En electrónica, por su elevada conductividad es empleada cada vez más, por ejemplo, en los contactos de circuitos integrados y teclados de ordenador.
- Fabricación de espejos de gran reflectividad de la luz visible (los comunes se fabrican con aluminio).

- La plata se ha empleado para fabricar monedas desde 700 ad, inicialmente con electrum, aleación natural de oro y plata, y más tarde de plata pura.
- En joyería y platería para fabricar gran variedad de artículos ornamentales y de uso doméstico cotidiano, y con menor grado de pureza, en artículos de bisutería.
- En aleaciones para piezas dentales.
- Aleaciones para soldadura, contactos eléctricos y baterías eléctricas de plata-cinc y plata - cadmio de alta capacidad.

**Tabla 7.***Propiedades físicas de la plata*

Propiedades Físicas	
<i>Estado de la materia</i>	Sólido
<i>Punto de fusión</i>	1234.93 °K
<i>Punto de ebullición</i>	2435 °K
<i>Entalpia de vaporización</i>	250.58 kJ/mol
<i>Entalpia de fusión</i>	11.3 kJ/mol
<i>Presión de vapor</i>	0.34 Pa a 1234 K
<i>Velocidad de sonido</i>	2600 m/s a 293.15 K
<i>Electronegatividad</i>	1.93 (Pauling)
<i>Calor específico</i>	232 J/(kg. °K)
<i>Conductividad térmica</i>	429 W/m°K
<i>Conductividad eléctrica</i>	$63 \times 10^6 \text{ m}^{-1} \Omega^{-1}$

**Fuente:** Elemento de la Plata, <https://www.quimica.es/enciclopedia/Plata.html>

## CAPITULO III

### PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

#### 3.1. Fundamentos de la experimentación

La eficiencia y rendimiento en un determinado proceso metalúrgico depende de la realización de pruebas de evaluación y/o optimización de los principales factores que afectan las diferentes áreas de fundición de los metales, en nuestro caso es la etapa de fundición de plata Ag, para llevar a cabo la optimización se verán reflejadas en el análisis energético de transferencia de calor que presenta en los diferentes hornos de fundición, en este caso se verá dicho análisis en los hornos de crisol (H.1) a gas y de residencia eléctrica o mufla (H.2).

Las pruebas experimentales permiten obtener valiosa información referente a las bondades técnicas y económicas que posee cada horno, con respecto a su rendimiento, energía y poder calorífico. Esta importancia indica que se debe realizar en forma metódica aplicando conocimientos, habilidades, capacidades y sobre todo ingenio e imaginación basado en la experiencia y cálculos matemáticos, para solucionar los problemas como es en la pérdida de calor y el manejo de sus respectivas variables.

##### ***3.1.1. Descripción técnica del horno de crisol a gas (H.1)***

Para realizar el análisis técnico del horno de crisol a gas, es necesario mencionar que los investigadores diseñaron y construyeron un nuevo modelo de horno de crisol (Fig. 13), acorde a las necesidades de los empresarios y artesanos cusqueños dedicados al rubro de la joyería. Este proyecto contó con el asesoramiento del investigador y ex docente de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Ronald

Walberto Surco Hilaquita, dicho modelo se muestra en la figura 13 y presenta la siguiente descripción:

- Tiene dos cabinas de operación, la primera cabina es utilizada para el proceso de fusión, y la segunda cabina es para el pre calentamiento de los moldes y colada del metal.
- Tiene una tapa con una abertura exacta para la chimenea, que tiene una facilidad para ser removida.
- La transferencia de calor se da por convección
- La fuente de calor es ejecutada desde un quemado que tiene como elemento de combustión el gas de GLP.
- Presenta una base de soporte, bastón torneado y 3 buzos para el fácil movimiento de las cabinas y tapa del horno.
- Está cubierto de acero inoxidable AISI 310.
- La parte interna del horno presenta una pared de dos capas de material refractario, la primera capa contiene fibra refractaria y la segunda capa sementó refractario con un 10 % de arcilla alcalínica y resiste a altas temperaturas.
- La operación del horno de crisol es mecánica y práctica.
- Temperatura constante de trabajo de la cabina de fundición 1120 °C
- Temperatura constante de trabajo de la cabina de secado 500 °C

**Figura 13.**

*Estructura física y grafica del horno de crisol (H.1)*



**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.1.2. Características técnicas de dimensión del horno de crisol H.1**

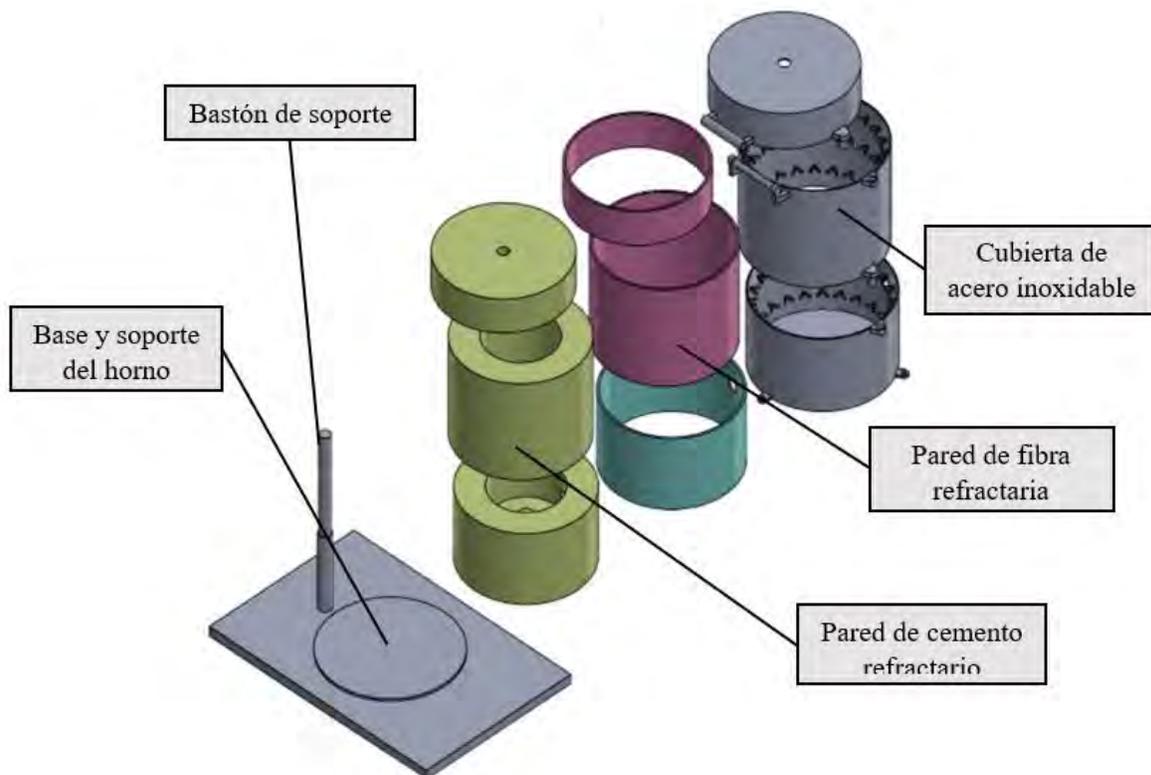
Es necesario tener en cuenta la diferentes características técnicas y dimensionales del horno de crisol, para esto se consideró lo siguiente:

- La base del horno tiene una medida de 60 x 40 cm
- El bastón tiene una altura de 36 cm
- La cabina de fundición tiene una altura de 15 cm y un diámetro de 28.4 cm
- La cabina de secado o pre calentamiento de moldes tiene una altura de 20 cm y diámetro de 28.4 cm.
- La tapa de horno tiene una altura de 10 cm, diámetro de 28.4cm y un diámetro de abertura de la chimenea 5 cm.

- La pared interior de cubierta refractaria del horno tiene una altura de 20cm y un ancho 7.5 cm.
- Las escalas y dimensiones del horno fueron diseñadas en el programa de SOLIDWORKS, el cual se muestra en la figura de 18.

**Figura 14.**

*Partes del horno de crisol.*



**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 8.***Características de horno de crisol a gas H.1*

<b>Descripción</b>	<b>Característica</b>
<i>Fuente de calor</i>	GLP
<i>Calor específico de la plata</i>	235 J/kg. °C
<i>Calor latente de fusión</i>	88,3 kJ/kg
<i>Dimensión del horno</i>	Altura: 45 cm; Diámetro: 28.4 cm; Base: 60 x 40cm
<i>Dimensión de la cabina de fundición</i>	Altura: 15 cm; Diámetro: 28.4 cm
<i>Dimensión de la tapa del horno</i>	Altura: 10 cm; Diámetro: 28.4 cm; Diámetro de abertura de la chimenea: 5 cm.
<i>Dimensión de la pared de cubierta refractaria</i>	Altura: 45 cm; Diámetro: 7.8 cm
<i>Material refractario</i>	Cemento y manta refractaria
<i>Dimensión del material refractario</i>	Fibra Refractaria: 300 x 200 x 150 mm
<i>Control de temperatura</i>	Pirómetro digital GM1350
<i>Flujo de aire</i>	Quemador de gas con flujo de aire ambiente
<i>Calor específico del crisol de arcilla</i>	1,000 kJ/kg. °C

**Fuente:** Elaboración propia.**Tabla 9.***Elementos del sistema de control.*

1	Pirómetro digital GM1350	
---	--------------------------	---

**Fuente:** Elaboración propia.

- Características técnicas del quemador de gas

**Tabla 10.**

*Características técnicas del quemador de gas para el horno de crisol H.1*

Quemador de gas del horno crisol H.1	Descripción de las características
	<p>Nombre del quipo: Quemador de gas</p> <p>Procedencia: Elaboración personal</p> <p>Aplicación: Hornos de fundición</p> <p>Diámetro de la cabeza de combustión: 45 mm</p> <p>Suministro de energía: 12.052 K cal/kg</p> <p>Combustible: GLP</p> <p>Ajuste manual de la entrada del aire y gas</p> <p>Potencia máxima del ventilador de aire: 0.6 KW</p>

**Fuente:** Elaboración propia.

### **3.1.3. Pruebas de fundición en el horno de crisol (H.1)**

#### **3.1.3.1. Materiales**

- Crisol cerámico para 1200 °C
- Plata piña 950
- Bórax
- Pinzas
- Moldes de arcilla refractaria

- Guantes de látex y de cuero
- Balanza digital

**Figura 15.**

*Determinación de masa de la plata en la balanza digital*



**Fuente.** Elaboración propia

**Figura 16.**

*Fúndete Bórax*



**Fuente:** Elaboración propia.

### 3.1.3.2. Etapas del proceso de fundición de la plata en el horno de crisol

- A. Etapa de preparación del molde:** Para el horno de crisol se utilizó como molde de vertido una lingotera de acero tal como se muestra en la figura 17.

*Figura 17.*

*Lingotera de acero para vertido de la colada*



Fuente: Elaboración propia

- B. Etapa de pre calentamiento del horno de crisol:** Para la fundición de la plata en el horno de crisol a gas (H.1), figura 17, se inicia preparando el horno de crisol, pesamos 68.84 g de plata, se vierte al crisol refractario y se introduce a la cabina de fundición del horno de crisol, seguidamente se prende el quemador a gas.

*Figura 18.*

*Etapa de calentamiento del horno*



Fuente: elaboración propia

**C. Etapa de fusión de la plata:** Fundir la plata en el horno hasta que alcance su punto de fusión y adicionar la temperatura de colada. En esta etapa es necesario agregar Borax tal como se muestra en la figura 19.

**Figura 19.**

*Fundición de la plata*



**Fuente:** elaboración propia

**D. Etapa de control de la temperatura:** El control de temperatura se realiza con un pirómetro digital láser (figura 20), en donde marca 1120 °C, en un tiempo de 47 min, dichos datos obtenidos se muestran en la figura 20.

**Figura 20.**

*Control de la temperatura*



**Fuente.** Elaboración propia

**E. Etapa de vertido del metal:** Verter la plata fundida en la cavidad del molde. Este paso debe realizarse con precisión para asegurar que el metal llené completamente a la lingotera y esperar a que se enfríe, este proceso se observa en la figura 21.

**Figura 21.**

*Colado de la plata fundida en la lingotera*



**Fuente.** Elaboración propia

**F. Etapa de enfriamiento y desmolde:** Una vez que el metal se ha enfriado y solidificado, se tiende a liberar o desmoldar la pieza fundida.

#### **3.1.4. Análisis de datos obtenidos en la fundición y desarrollo de las expresiones matemáticas**

Se realizó 2 pruebas, en donde se realizó en mismo proceso de fundición considerando la misma masa y variante en la elevación e la temperatura, el cual se muestra en las siguientes tablas 11 y 12.

**Tabla 11.***Tabla de control de pruebas 1 y 2 en el horno H.1***Fuente.** Elaboración propia

1		2	
t (min)	°T	t (min)	°T
0	120	0	124
5	188	5	196
10	246	10	259
15	294	15	298
20	340	20	320
25	416	25	428
30	552	30	563
35	664	35	668
40	769	40	772
45	864	45	864
50	942	50	958
52	1120	52	1119

**Fuente:** elaboración propia**Tabla 12.***Resumen de pruebas*

Pruebas	Masa Ag (gr)	Tiempo (min)	° T max. Colada (°C)	°T fusión Ag (°C)
1	68.84	52	1120	962
2	68.84	52	1119	962

**Fuente:** elaboración propia

A continuación, se presentan las expresiones térmicas que se utilizan para desarrollar un análisis térmico en el horno de crisol (H.1):

### 3.1.4.1. Cantidad de calor requerido

Es necesario conocer la cantidad de calor que necesita el horno (figura 22), para llevar a cabo el proceso de fundición de la plata, por lo tanto, se aplica la siguiente ecuación.

$$Q_{req} = Q_{Ag} + Q_{ab\ crisol}$$

En donde:

- **Qreq** = Cantidad de calor requerido (kJ).
- **QAg** = Cantidad de calor entregado a la plata (kJ).
- **Qab crisol** = Cantidad de calor absorbido por el crisol (kJ)

**Figura 22.**

*Horno de Crisol H.1.*



**Fuente.** Elaboración propia

### 3.1.4.2. Cantidad de calor requerido por la plata

Para calcular la cantidad de calor suministrada a la plata, es esencial tener en cuenta los siguientes puntos:

- Es necesario determinar la cantidad de calor requerida para elevar la temperatura de la plata desde 11.2 °C (temperatura ambiente considerada) hasta 962 °C (temperatura de fusión de la plata).
- Determinar Calcular el calor necesario para que la plata experimente el proceso de calor latente, que implica el cambio de su estado de sólido a líquido.
- Asegurar que la plata mantenga condiciones adecuadas para ser vertida en los moldes correspondientes; para ello, se requiere que alcance una temperatura de 1120 °C.

Se aplican las siguientes ecuaciones:

- **Cantidad de calor para elevar 11.2 °C a 962°C.**

$$Q_1 = C. m. \Delta T$$

En donde:

- **Q1** = Cantidad de calor para elevar 11.2 °C a 962 °C (kJ)
- **C** = Calor específico (kJ/kg.K)
- **m** = Masa (kg)
- **ΔT** = variación de temperatura (K)

Sabiendo que el calor específico de la plata es de 235 J/kg.°C, según la tabla 18, y que la masa de la plata necesaria para la fundición es de 0.06884 kg, con una elevación de temperatura de 11.2 °C a 962 °C, se puede determinar lo siguiente:

$$Q_1 = 235 \frac{J}{kg} \cdot ^\circ C \times 0.06884 kg \times (962 - 11.2) ^\circ C$$

$$Q_1 = 15.381 kJ$$

- **Cantidad de calor para cambio de fase**

$$Q_2 = m \cdot \gamma$$

En donde:

- **Q2** = Cantidad de calor para cambio de fase (kJ).
- $\gamma$  = Calor latente de la plata (kJ/kg).
- **m** = masa [kg].

Conociendo el valor del calor latente de fusión de la plata que según la ANEXO 12 es de 88.3 kJ/kg y la masa de la plata que es de 0.06884 kg, se puede obtener lo siguiente.

$$Q_2 = 0.06884 \text{ kg} \cdot 88.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_2 = 6.078572 \text{ kJ}$$

- **Cantidad de calor para alcanzar la temperatura de colado**

$$Q_3 = C \cdot m \cdot \Delta T$$

En donde:

- **Q3** = Cantidad de calor para alcanzar la temperatura de colado (kJ)
- **C** = Calor específico (kJ/kg.K).
- **m** = masa [kg].
- $\Delta T$  = variación de temperatura (K).

Sabiendo que el calor específico de la plata es de 235 J/kg.°C, la masa de plata necesaria para la fundición es de 0.06884 kg y la elevación de temperatura es de 962 °C a 1120 °C, se puede calcular lo siguiente:

$$Q_3 = 235 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \times 0.06884 \text{ kg} \times (1120 - 962)^\circ C$$

$$Q_3 = 2.556 \text{ kJ}$$

- **Cantidad total de calor entregado a la plata**

La cantidad total de calor suministrada a la plata se calcula sumando el calor necesario para elevar la temperatura de 11.2 °C a 962 °C, el calor requerido para el cambio de fase, y el calor necesario para alcanzar la temperatura de colado. Para ello, se utiliza la siguiente expresión matemática.

$$QT_{Ag} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$QT_{Ag} = 15.3815 \text{ kJ} + 6.0786 \text{ kJ} + 2.556 \text{ kJ}$$

$$QT_{Ag} = 24.016 \text{ kJ}$$

### 3.1.4.3. Cantidad de calor absorbido por el crisol

Es fundamental determinar la cantidad de calor que absorbe el crisol en el horno de fundición H.1. Para ello, se emplea la siguiente expresión matemática.

$$Q_{ab \text{ crisol}} = C \cdot m \cdot \Delta T$$

En donde:

- $Q_{ab \text{ crisol}}$  = Cantidad de calor absorbido por el crisol (kJ)
- $C$  = Calor específico del crisol (kJ/kg.K)
- $m$  = masa del crisol (kg)
- $\Delta T$  = variación de temperatura (K)

Con el calor específico del crisol, que según la tabla 8 es de 1000 J/kg.°K, una masa del crisol de 0.250 kg, y la elevación de la temperatura de 11.2 °C (temperatura ambiente) a 1000 °C (temperatura de colado de la plata), se puede calcular lo siguiente.

$$Q_{ab\ crisol} = 1000 \frac{J}{kg \cdot ^\circ K} \cdot 0.205\ kg \cdot (1120 - 11.2)^\circ C$$

$$Q_{ab\ crisol} = 283.2998\ kJ$$

#### **3.1.4.4. Cantidad de calor requerido para la fundición de la plata**

Para calcular la cantidad de calor necesaria para fundir la plata, es esencial sumar el calor requerido para la fusión y el calor absorbido por el crisol, y luego dividir esta suma por un tiempo de fundición considerado de 52 minutos. Para esto, se emplea la siguiente expresión matemática.

$$Q_{fundición} = \frac{QT_{Ag} + Q_{ab\ crisol}}{t}$$

$$Q_{fundición} = \frac{24.016\ kJ + 283.30\ kJ}{3120\ s}$$

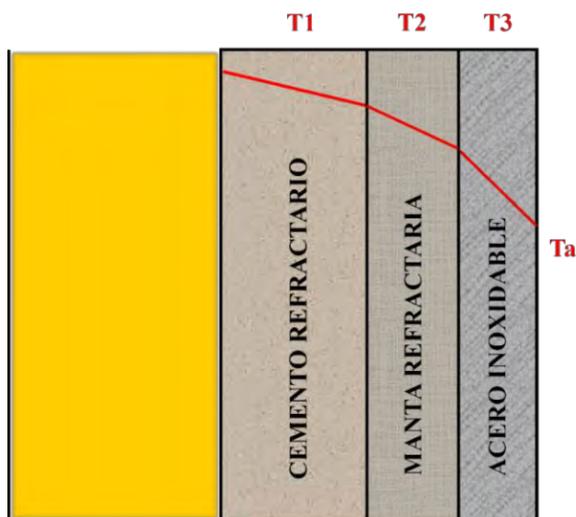
$$Q_{fundición} = 0.098\ kW$$

#### **3.1.4.5. Cantidad de calor perdido por las paredes**

Es fundamental determinar la cantidad de calor que se pierde durante el proceso de fundición de la plata utilizando el horno de crisol H.1. Para ello, se deben analizar los siguientes perfiles de temperatura.

**Figura 23.**

*Perfil de temperaturas en el interior del horno H. 1*



**Fuente:** elaboración propia

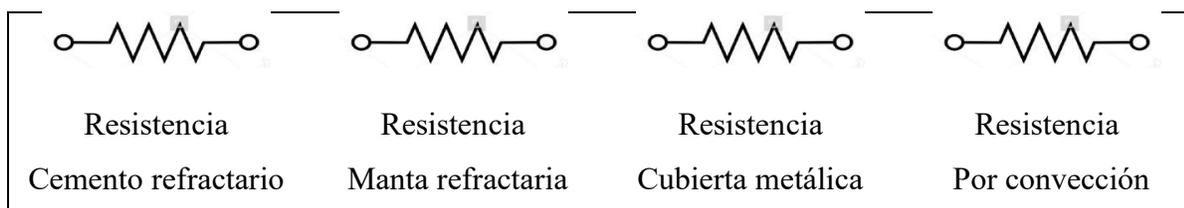
De la figura 26 se puede destacar lo siguiente:

- T1: Temperatura de la pared interior del horno (°C)
- T2: Temperatura del cemento refractario y la manija metálica de acero Inox (°C)
- T3: Temperatura exterior del horno (°C)
- Ta: Temperatura ambiental (°C)

En la figura siguiente se pueden observar las resistencias térmicas utilizadas para determinar la transferencia de calor a través de las paredes planas compuestas por diferentes materiales.

**Figura 24.**

*Resistencias térmicas en el horno H. 1*



### 3.1.4.6. Coeficiente de transferencia de calor por convección

Tomando en cuenta las dimensiones del horno de crisol H.1, es necesario calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección para paredes cilíndricas. Para ello, primero se determina la temperatura de película utilizando la siguiente expresión matemática.

$$T_p = \frac{T_a + T_3}{2}$$

En donde:

- $T_p$  = Temperatura de película (°K)
- $T_a$  = Temperatura ambiente (°K)
- $T_3$  = Temperatura de la manija metálica de acero Inox (°K)

Conociendo que la temperatura ambiente es de 11.2 °C (284.35 K) y la temperatura de la manija metálica de acero inoxidable es de 60 °C (333 K), se puede calcular lo siguiente.

$$T_p = \frac{284.35^\circ K + 333.15^\circ K}{2}$$

$$T_p = 308.75$$

Utilizando el valor de la temperatura obtenido mediante la ecuación previa, es posible calcular las propiedades del aire a esa temperatura de película.

**Tabla 13.***Propiedades del aire a la temperatura de película de la cubierta metálica*

Temperatura (°K)	Viscosidad cinemática del aire (m <sup>2</sup> /s)	Conductividad térmica del aire (W/m.°K)	Difusividad térmica $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Constante de Prandtl
307.8	16.55 x 10 <sup>-6</sup>	26.25 x 10 <sup>-3</sup>	22.77 x 10 <sup>-6</sup>	0.7268

**Fuente:** Elaboración propia

- **Cálculo del número de Rayleigh**

$$R_{\alpha} = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_a) \cdot L^3}{V \cdot \alpha}$$

En donde:

- $R_a$  = Número de Rayleigh
- $g$  = gravedad (m/s<sup>2</sup>)
- $T_s$  = Temperatura de salida (°K)
- $T_a$  = Temperatura ambiente (°K)
- $L$  = Altura (m)
- $V$  = Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)
- $\alpha$  = 22.77 x 10<sup>-6</sup> (m<sup>2</sup>/s)
- $\beta$  = 1 /  $T_p$

Dado el valor de la gravedad, que es de 9.81 m<sup>2</sup>/s, la temperatura de salida de 333.15 K, la temperatura ambiente de 11.2 °C (284.35 K), la altura del horno H.1 de 0.45 m, y el valor de la

viscosidad cinemática de acuerdo con la tabla 13, que es de  $16,55 \times 10^{-6}$  ( $m^2/s$ ), se puede calcular lo siguiente:

$$Ra = \frac{9,81 \frac{m}{s^2} \cdot 0.00324675 \cdot (333.15 - 284.35) \cdot 0.45^3}{16.55 \times 10^{-6} \cdot 22.77 \times 10^{-6}}$$

$$Ra = 375849685.5$$

El resultado obtenido de la expresión matemática, que representa el número de Rayleigh, excede los  $10^9$ , lo que indica un flujo turbulento. Por consiguiente, la expresión para el número de Nusselt es la siguiente:

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

En donde:

- $R_a$  = Número de Rayleigh
- $Pr$  = Número de Prandtl

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot (375849685.5)^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{0.7268} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$Nu = 94.14$$

- **Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección**

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

En donde:

- $h_c$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m^2 \cdot ^\circ K$ ).
- $Nu$  = Número de Nusselt.
- $k$  = Conductividad térmica ( $W/m \cdot ^\circ K$ )
- $L$  = Altura [m].

$$h_c = \frac{94.14 \times 26.25 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^\circ K}}{0,45 m}$$

$$h_c = 5.49 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

### 3.1.4.7. Pérdida de calor por transferencia

Las pérdidas de calor presentes en el horno de fundición de plata H. 1 se determina a través de las paredes del horno.

- **Pérdida de calor por conducción**, considerar datos de la tabla 14

$$Q_{p \text{ cond}} = \frac{T_1 - T_3}{\left( \frac{e_{refra}}{k_{refra} \cdot A_{refra}} \right) + \left( \frac{e_{manta}}{k_{manta} \cdot A_{manta}} \right) + \left( \frac{e_{acero}}{k_{acero} \cdot A_{acero}} \right)}$$

En donde:

- $Q_{p \text{ cond}}$  = Pérdida por conducción (W).
- $T_1$  = Temperatura interna del horno ( $^\circ K$ )
- $T_3$  = Temperatura en la manija metálica de acero Inoxidable ( $^\circ K$ ).

- $L$  = Altura (m).
- $K_{\text{refra}}$  = Conductividad térmica del cemento refractario (W/m.°K)
- $k_{\text{acero}}$  = Conductividad térmica de la manija metálica de acero Inox (W/m.°K)
- $e_{\text{refra}}$  = Espesor del cemento refractario (m).
- $e_{\text{manta}}$  = Espesor de la manta refractaria (m)
- $e_{\text{metal}}$  = Espesor de la cubierta metálica de acero Inox (m).
- $A_{\text{refra}}$  = Área del cemento refractario (m<sup>2</sup>).
- $A_{\text{ch. metal}}$  = Área de la manija metálica de acero Inox (m<sup>2</sup>).

**Tabla 14.**

*Datos para el cálculo de la pérdida de calor por conducción.*

Descripción	Valores
Temperatura interna del horno	1120 °C (1393.15 °K)
Temperatura de la cubierta metálica	60 °C (333.15 °K)
Altura del horno	0,45 m
Conductividad térmica del cemento refractario	1,2 W/m.°K
Conductividad térmica de la manta refractaria	0.068 W/m°K
Conductividad térmica de la cubierta metálica	16.3 W/m.°K
Espesor del cemento refractario	5.6 cm
Espesor de la manta refractaria	2.2 cm
Espesor de la cubierta metálica	0.25 cm
Área del cemento refractario	4207.5 cm <sup>2</sup>
Área del cemento refractario	4207.5 cm <sup>2</sup>
Área de la cubierta metálica	4207.5 cm <sup>2</sup>

**Fuente:** Elaboración propia

$$Q_{p\ cond} = \frac{1393.15\ ^\circ K - 333.15\ ^\circ K}{\left(\frac{0.056\ m}{1,2\ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.42075\ m^2}\right) + \left(\frac{0.022\ m}{0.068\ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.42075\ m^2}\right) + \left(\frac{0.0025\ m}{16.3\ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.42075\ m^2}\right)}$$

$$Q_{p\ cond} = 1204.25\ W$$

- **Pérdida de calor por convección**, considerar datos de la tabla 15:

$$Q_{p\ conv} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{A \cdot h_c}}$$

En donde:

- **Q<sub>p conv</sub>** = Pérdida por convección (W)
- **T<sub>a</sub>** = Temperatura ambiental (°K)
- **T<sub>3</sub>** = Temperatura en la manija de acero Inox (°K).
- **A** = Área (m<sup>2</sup>)
- **h<sub>c</sub>** = Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m<sup>2</sup>·°K).

**Tabla 15.**

*Datos para el cálculo de la pérdida de calor por conducción.*

Descripción	Valores
Temperatura ambiental	11.2 °C (284,35 °K)
Temperatura de la cubierta metálica	60 °C (333.15 °K)
Área	0.42075 m <sup>2</sup>
Coeficiente de transferencia de calor por convección	5.49 W/(m <sup>2</sup> ·°K)

**Fuente:** Elaboración propia.

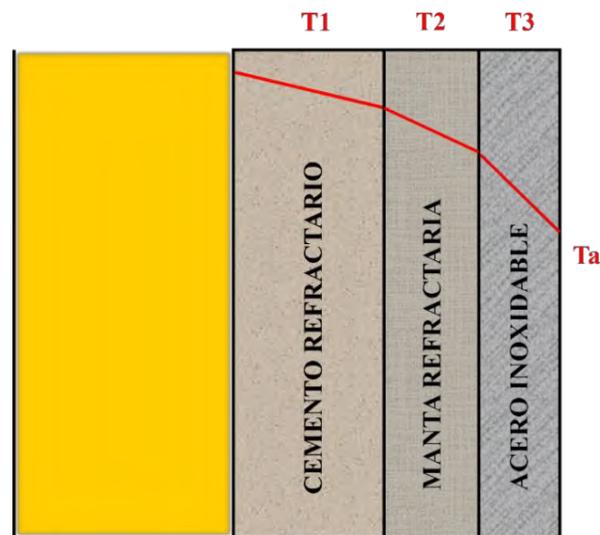
$$Q_{p\ conv} = \frac{333.15\ ^\circ K - 284.35\ ^\circ K}{\left( \frac{1}{0.42075\ m^2 \cdot 5.49\ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}} \right)}$$

$$Q_{p\ conv} = 112.72\ W$$

### 3.1.4.8. Perdida de calor por transferencia de la tapa del horno

Para calcular la cantidad de calor que se pierde a través de la tapa del horno de crisol H.1, se lleva a cabo un análisis de transferencia de calor considerando la conducción y la convección, tal como se ilustra en la figura 25:

**Figura 25.** Perfil de la temperatura en la tapa del horno H.1



Fuente: elaboración propia

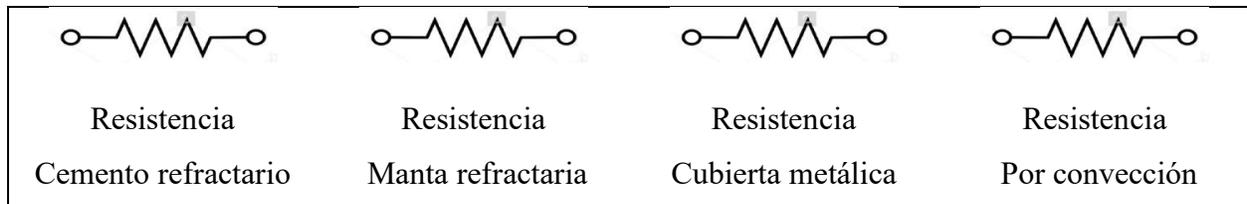
De la figura se puede destacar lo siguiente:

- T1: Temperatura de la manta refractaria (°C)
- T2: Temperatura del ladrillo refractario (°C)
- T3: Temperatura de la cubierta metálica (°C)

- $T_a$ : Temperatura ambiental ( $^{\circ}\text{C}$ )

En la figura 26 muestran las resistencias térmicas utilizadas para analizar la transferencia de calor mediante conducción y convección en superficies planas.

**Figura 26.** Resistencias térmicas en la tapa del horno H.1



Fuente. Elaboración propia

- **Temperatura de película**

Dado el valor de la temperatura ambiente, que es de  $11.2^{\circ}\text{C}$  ( $284.35\text{ K}$ ), y el valor de la temperatura de la cubierta metálica de acero inoxidable, que es de  $60^{\circ}\text{C}$  ( $333\text{ K}$ ), se puede calcular lo siguiente.

$$T_p = \frac{284.35^{\circ}\text{K} + 333.15^{\circ}\text{K}}{2}$$

$$T_p = 308.75$$

Con el valor de la temperatura determinada por medio de la ecuación anterior se puede obtener las propiedades del aire con temperatura de película el cual se muestra en la tabla 16.

**Tabla 16.***Propiedades del aire a la temperatura de película de la tapa*

Temperatura (°K)	Viscosidad cinemática del aire (m <sup>2</sup> /s)	Conductividad térmica del aire (W/m.°K)	Difusividad térmica $\alpha$ (m <sup>2</sup> /s)	Constante de Prandtl
307.8	$16.55 \times 10^{-6}$	$26.25 \times 10^{-3}$	$22.77 \times 10^{-6}$	0.7268

Fuente. Elaboración propia

- **Cálculo de numero de Rayleigh**

Utilizando la expresión matemática para determinar el número de Rayleigh, se tiene de datos los siguientes:

- Gravedad que es de 9,81 m<sup>2</sup>/s
- Temperatura de salida 333.15 °K
- Temperatura ambiente que es 11.2 °C (284.35 °K)
- Altura del horno que es 0.1 m
- Valor de viscosidad cinemática que es de  $16.55 \times 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s)

$$R_a = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\alpha) \cdot L^3}{V \cdot \alpha}$$

$$R_a = \frac{9.81 \frac{m}{s^2} \cdot 0.00324675 \cdot (333.15 - 284.35) \cdot 0.1^3}{16.55 \times 10^{-6} \cdot 23.77 \times 10^{-6}}$$

$$R_a = 4124550.733$$

El número de Rayleigh calculado supera los  $10^7$ , indicando un flujo turbulento. Por consiguiente, se emplea la ecuación correspondiente para determinar el valor del número de Nusselt.

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot (4124550.733)^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{0.7268} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$Nu = 25.1$$

- **Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección**

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección, se utiliza la siguiente ecuación, que proporciona los siguientes resultados.

$$h_c = \frac{27.155 \times 26.62 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^\circ K}}{0,1 m}$$

$$h_c = 6.589 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- **Perdida de calor por conducción**

Según muestra la figura 27 se puede determinar el valor de la pérdida de calor por conducción de la tapa del horno H.1, por medio de la expresión matemática.

**Figura 27.**

Cubierta la tapa del horno eléctrico H.2



Fuente. Elaboración propia

$$Q_{p\ cond} = \frac{T_1 - T_3}{\left(\frac{e_{cemento}}{k_{cemento} \cdot A_{cemento}}\right) + \left(\frac{e_{manta}}{K_{manta} \cdot A_{manta}}\right) + \left(\frac{e_{acero}}{k_{acero} A_{acero}}\right)}$$

$$= \frac{1235.15 - 33.15}{\left(\frac{1393.15\ m}{1.2 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.063347\ m^2}\right) + \left(\frac{0.022}{0.068 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.063347\ m^2}\right) + \left(\frac{0.0025}{16.3 \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.063347\ m^2}\right)}$$

$$Q_{p\ Cond} = 181.30\ w$$

- **Perdida de calor por convección:** Considerar datos de la tabla 17.

$$Q_{P\ conv} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{A \cdot hc}}$$

En donde:

- $Q_{p\ conv}$ . = Perdida de calor por convección (W)
- $T_a$  = Temperatura ambiental ( $^\circ K$ )
- $T_3$  = Temperatura de la cubierta metálica ( $^\circ K$ )

- $A = \text{Área (m}^2\text{)}$
- $h_c = \text{Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m} \cdot \text{°K)}$

**Tabla 17.**

*Datos de cálculo de la pérdida de calor por conducción H.1*

Descripción	Valores
Temperatura ambiente	60 °C (333.15 °K)
Temperatura de la cubierta metálica	11.2 °C (284 °K)
Área	0.063347 m <sup>2</sup>
Coeficiente de transferencia de calor por convección	6.589 W/m <sup>2</sup> °K

Fuente. Elaboración propia

$$Q_{p \text{ conv}} = \frac{333.15 \text{ °K} - 284.35 \text{ °K}}{\frac{1}{0.063347 \text{ m}^2 \cdot 6.589 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°K}}}}$$

$$Q_{p \text{ conv}} = 20.369 \text{ W}$$

- **Pérdida de calor total en el horno de fundición de plata H. 1**

Este valor se obtiene mediante la suma de todas las pérdidas de calor calculadas previamente, teniendo en cuenta la superficie cilíndrica del horno según su perímetro y área.

$$Q_{p \text{ total}} = Q_{p \text{ cond}} + Q_{p \text{ conv}} + (2 \text{ bases})Q_{p \text{ cond}} + (2 \text{ bases})Q_{p \text{ conv}}$$

$$Q_{p \text{ total}} = 1204.25 \text{ W} + 112.72 \text{ W} + 403.338 \text{ W}$$

$$Q_{p \text{ total}} = 1.720 \text{ kW}$$

### 3.1.4.9. *Energía total en el horno de crisol de plata H. 1*

Para determinar la cantidad de calor requerida para la fusión de la plata, teniendo en cuenta las pérdidas en el horno de crisol H. 1 y considerando un tiempo de operación de 52 minutos, se analiza a través de un balance de energía de la siguiente forma.

$$Q_{TOTAL} = Q_{fundición} + Q_{p\ total}$$

Donde:

- $Q_{fundición} = 0.098\text{ kW}$
- $Q_{p\ total} = 1.720\text{ kW}$

$$Q_{TOTAL} = 0.098\text{ kW} + 1.720\text{ kW}$$

$$Q_{TOTAL} = 1.818\text{ kW}$$

### 3.1.4.10. *Cantidad de calor suministrado*

Se procede a realizar el cálculo de la cantidad de calor proporcionada por la fuente de calor para llevar a cabo el proceso de fundición de la plata, para ello, se emplea la siguiente fórmula:

$$Q_s = \frac{P \cdot m}{t}$$

En donde:

- **Qs** = Cantidad de calor suministrado (kJ)
- **P** = Poder calorífico (kJ/kg)
- **m** = masa (kg)
- **t** = tiempo (s)

El valor del poder calorífico del GLP es de 12,052 kcal/kg (50,449.7 kJ/kg). Se utilizó un balón de GLP con una masa de 10 kg, de los cuales se consumieron 1.8 kg. Este consumo permitió obtener el siguiente resultado.

$$Q_s = \frac{50.4497 \frac{kJ}{kg} \cdot 1.8 kg}{52 min}$$

$$Q_s = 9.702 kW$$

### **3.1.4.11. Rendimiento del horno de fundición H. 1**

El rendimiento del horno de fundición de plata H.1 se puede determinar por medio de la siguiente expresión matemática.

$$\eta = \frac{Q_s - Q_{TOTAL}}{Q_s} \cdot 100\%$$

$$\eta = \frac{9.702 kW - 1.818 kW}{9.702 kW} \cdot 100\%$$

$$\eta = 81.26 \%$$

### **3.1.5. Descripción técnica del horno de resistencia eléctrica o mufla H.2**

Para el análisis técnico del horno de resistencia eléctrica o mufla, se utilizó el horno de mufla, (Figura 28) de la empresa Arte y Joyería Huilca (R.U.C. 10803176154) , representada por el Ingeniero Rómulo Gaspar Huilca Achahui. En este análisis se tomaron en cuenta las siguientes consideraciones: dimensiones de la cámara interna, materiales de la estructura externa e interna del horno, temperatura de operación, calor transferido por los elementos del horno mufla y propiedades térmicas de los materiales utilizados, las cuales son las siguientes:

- Presenta una puerta abatible mecánica que se desliza hacia arriba.
- La cubida de fusión presenta una pared de ladrillos refractario.
- El poder calorífico es emitido desde una alimentación eléctrica de 220 V, potencia eléctrica de 3300 W y un amperaje de 15 A, que es conducido a fuentes de resistencia eléctrica en donde la emisión es por radiación.
- La transferencia de calor se da por radiación.
- Tiene una temperatura constante de trabajo = 962°C y una temperatura regulable hasta 1000°C, según los datos y catálogos de venta.
- Presenta un controlador digital que permite visualizar el límite máximo de la temperatura.
- La cubierta externa de la estructura es de acero negro.
- Su peso general del equipo es de 40 kg.
- Su funcionamiento es semiautomático.

**Figura 28.**

*Horno eléctrico para fundición de plata H. 2.*



**Fuente:** Fotografía propia

### 3.1.5.1. Características técnicas de dimensión del horno de resistencia eléctrica (Tabla 18)

- Tiene una medida de 38 x 45 cm.
- Tiene una altura de 50 cm.
- La puerta abatible tiene una medida de 25 x 25 cm.
- La cabina de fundición presenta una medida de 25 x 20 cm y una altura de 20 cm.
- La manija o mango de movimiento de la puerta abatible tiene una medida de 18 cm.

**Tabla 18.**

*Características del horno eléctrico para la fundición de plata H.2.*

<b>Descripción</b>	<b>Característica</b>
Fuente de calor	Energía eléctrica
Calor específico de la plata	235 J/kg.°C
Calor latente de fusión	88.3 kJ/kg
Dimensión del horno	Altura: 23.5cm; largo: 36cm; ancho 36 cm.
Dimensión de la cámara de combustión	Altura: 20 cm; largo: 25 cm; ancho 20 cm.
Material refractario	Ladrillo refractario Cubierta metálica
Dimensión del material refractario	6.2 x 11.5 x 23 cm
Control de temperatura	Pirómetro digital GM1350
Flujo de aire	Blower
Masa del crisol	0.5 kg
Calor específico del crisol	1000 J/kg K

**Fuente:** Elaboración propia.

- **Elementos utilizados para el sistema de control de temperatura**

El método de control empleado para regular la temperatura en el horno de mufla es de tipo ON/OFF, donde la salida del controlador se activa o desactiva completamente, sin ofrecer un estado intermedio. En la tabla 19 se detallan los componentes empleados en este control:

**Tabla 19.**

*Elementos del sistema de control*

Cantidad	Detalle	Descripción fotográfica
1	Luces indicadoras	
1	Interruptor Termomagnético 20 A	
1	Controlador de temperatura	

### 3.1.6. Prueba de fundición en el horno eléctrico H.2

#### 3.1.6.1. Materiales

Se considera los mismo materiales descrito y utilizado en el horno H.1, a la vez se considera el peso de la plata y del crisol de arcilla en cual se muestra en la figura 29 y 30.

**Figura 29.**

*Peso de la plata a fundir en el horno eléctrico*



**Fuente:** Elaboración propia

**Figura 30.**

*Peso real del crisol*



**Fuente:** Elaboración propia

### ***3.1.6.2. Etapas del proceso de fundición de la plata en el horno eléctrico***

- A. Etapa de preparación de molde:** Para el horno de eléctrico se utilizó la arcilla refractaria traída desde el distrito de San Pedro y San Pablo como molde de vertido, tal como se muestra en la figura 31.

**Figura 31.**

***Preparación de moldes de arcilla refractaria***



Fuente: elaboración propia

- B. Etapa de pre calentamiento del horno eléctrico:** En esta etapa se recurre al encendido del horno, y se agrega 68.84 g de plata a los 23 °C de temperatura.
- C. Etapa de fusión del metal:** Fundimos la plata en el horno eléctrico hasta que alcance su punto de fusión y adicionamos la temperatura de colada, en esta etapa es necesario agregar Borax. Además, se aprovecha el espacio del horno para el secado de moldes, tal como se muestra en la figura 32 y 33.

**Figura 32.**

***Etapa de calentamiento del horno y secado de moldes***



Fuente: elaboración propia

**Figura 33.**

*Etapa de fundición de la plata en el horno eléctrico*



**Fuentes.** Elaboración propia

**D. Etapa de control de la temperatura:** Se toma el control de la temperatura de elevación cada 4 min, según marca la temperatura en la pantalla de control digital del horno eléctrico, tal como se muestra en la figura 34.

**Figura 34.**

*Control de la temperatura del horno eléctrico*



**Fuente:** elaboración propia

**E. Etapa de vertido de metal:** Verter el metal fundido en la cavidad del molde. Este paso debe realizarse con precisión para asegurar que el metal llene completamente la cavidad sin crear defectos, tal como se muestra en la figura 35.

*Figura 35.*

*colado de la plata al molde*



Fuente: Elaboración propia

**F. Etapa de enfriamiento y desmolde:** Una vez que el metal se ha enfriado y solidificado, se rompe el molde para liberar la pieza fundida.

### ***3.1.7. Expresiones térmicas aplicadas en la fundición de plata H. 2***

Para la etapa de fundición en el horno de resistencia eléctrica H.2, se realizó dos pruebas, dentro de las cuales se considera la misma masa y como dato general el punto de fusión de la plata Ag, el cual se muestra en las siguientes tablas 20 y 21:

**Tabla 20.***Tabla de control de pruebas 1 y 2 en el horno H.2*

<b>1</b>		<b>2</b>	
<b>t (min)</b>	<b>°T</b>	<b>t (min)</b>	<b>°T</b>
0	23	0	23
4	93	4	102
8	152	8	196
12	200	12	247
16	295	16	298
20	377	20	378
24	463	24	467
28	530	28	525
32	608	32	664
36	754	36	741
40	872	40	862
44	992	44	989
47	1085	47	1114

**Fuente:** Elaboración propia**Tabla 21.***Resumen de pruebas H.2*

<b>Pruebas</b>	<b>Masa Ag (gr)</b>	<b>Tiempo (min)</b>	<b>° T max. Colada (°C)</b>	<b>°T fusión Ag (°C)</b>
1	68.84	47	1085	962
2	68.84	47	1114	962

**Fuente:** elaboración propia

A continuación, se expresan las formulaciones térmicas que se emplean para llevar a cabo un análisis térmico del horno de fundición de plata H. 2.

### 3.1.7.1. Cantidad de calor requerido

Para calcular la cantidad de energía térmica requerida por el horno eléctrico de mufla para fundir plata, se emplea la siguiente fórmula.

$$Q_{req} = Q_{Ag} + Q_{ab\ crisol}$$

### 3.1.7.2. Calor suministrado a la plata

Es necesario volver a aplicar los 3 aspectos conocidos anteriormente:

- **Cantidad de calor para elevar 11.2 °C a 962 °C**

Al igual que en el caso del horno de fundición de plata H.2, al determinar la cantidad de calor necesaria para elevar la temperatura de 11.2 °C a 962 °C, se obtiene el siguiente resultado mediante la aplicación de la ecuación:

$$Q_1 = C_e \cdot m \cdot \Delta T$$

Con el conocimiento del calor específico de la plata, establecido en 235 J/kg.°C según la tabla 17, y considerando una masa de plata necesaria para la fundición de 68.84 g (equivalente a 0.06884 kg), junto con un aumento de temperatura desde 11.2 °C hasta 962 °C, se pueden calcular los siguientes resultados.

$$Q_1 = 235 \frac{J}{kg \cdot ^\circ C} \cdot 0.06884 \text{ Kg} \cdot (962 - 11.2)^\circ C$$

$$Q_1 = 15.381 \text{ kJ}$$

- **Cantidad de calor para cambio de fase**

Utilizando la ecuación se obtiene el valor del cambio de fase de la plata, por lo tanto, se obtiene que:

$$Q_2 = m \cdot \gamma$$

Teniendo en cuenta el valor del calor latente de fusión de la plata, establecido en 88.3 kJ/kg según el ANEXO 12, y considerando una masa de plata de 68.84 g (equivalente a 0.06884 kg), se pueden calcular los siguientes resultados.

$$Q_2 = 0.06884 \text{ kg} \times 88.3 \frac{\text{kJ}}{\text{kg}}$$

$$Q_2 = 6.079 \text{ kJ}$$

- **Cantidad de calor para alcanzar la temperatura de colado**

Mediante el desarrollo de la ecuación se obtiene el valor de la temperatura del colado, el cual es:

$$Q_3 = C_e \cdot m \cdot \Delta T$$

Dado el calor específico conocido de la plata, que es de 235 J/kg.°C, junto con la masa necesaria de plata para la fundición, que es de 0.06884 kg, y la elevación de temperatura de 962 °C a 1100 °C, se pueden calcular los siguientes resultados.

$$Q_3 = 235 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}} \cdot 0.06884 \text{ Kg} \cdot (1100 - 962)^\circ\text{C}$$

$$Q_3 = 2.232 \text{ kJ}$$

- **Cantidad total de calor entregado a la plata**

La cantidad total de calor suministrado a la plata se calcula mediante la suma del calor necesario para elevar la temperatura desde 11.2 °C hasta 962 °C, el calor de fusión y el calor necesario para alcanzar la temperatura de colado. Esto se expresa mediante la siguiente ecuación matemática.

$$Q_{T Ag} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

$$Q_{T Ag} = 15.381 \text{ kJ} + 6.079 \text{ kJ} + 2.232 \text{ kJ}$$

$$Q_{T Ag} = 23.692 \text{ kJ}$$

### 3.1.7.3. Cantidad de calor absorbido por el crisol

Es de gran importancia e indispensable determinar la cantidad de calor absorbido por el crisol del horno eléctrico H.2. Para esto, se emplea la siguiente fórmula matemática:

$$Q_{ab \text{ crisol}} = C_e \cdot m \cdot \Delta T$$

Teniendo en cuenta el coeficiente de calor específico del crisol utilizado, que según el anexo 12 es de 1000 J/kg.°K, así como la masa del crisol de 0.205 kg y la elevación de temperatura desde 11.2 °C (temperatura ambiente) hasta 962 °C (temperatura de colado de la plata), se puede calcular lo siguiente:

$$Q_{ab \text{ crisol}} = 1000 \frac{\text{J}}{\text{kg} \cdot \text{°K}} \cdot 0.205 \text{ Kg} \cdot (1100 - 11.2) \text{°C}$$

$$Q_{ab \text{ crisol}} = 279.1998 \text{ kJ}$$

### 3.1.7.4. Cantidad de calor requerido para la fundición de plata

Para calcular la cantidad de calor necesaria para llevar a cabo el proceso de fusión de la plata, es esencial realizar la suma del calor requerido y el calor absorbido por el crisol, y luego dividirlo por el tiempo de fundición considerado de 45 minutos (2700 segundos). Esto se logra mediante la siguiente expresión matemática:

$$Q_{fundicion} = \frac{Q_{T Ag} + Q_{ab crisol}}{t}$$

$$Q_{fundicion} = \frac{23.692 \text{ kJ} + 279.1998 \text{ kJ}}{2700 \text{ s}}$$

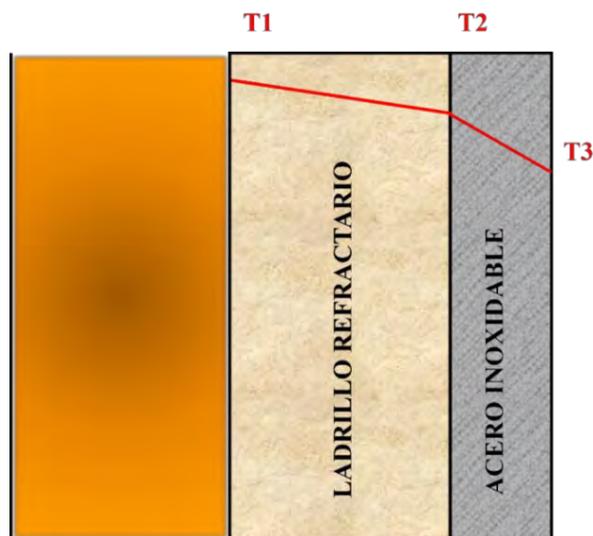
$$Q_{T Ag} = 0.11218 \text{ kW}$$

### 3.1.7.5. Cantidad de calor perdido

Es importante conocer la cantidad de calor que se pierde en el proceso de fundición de la plata utilizando el horno eléctrico H.2, para lo cual se analizan los siguientes perfiles de temperatura.

**Figura 36.**

*Perfil de temperaturas en el interior del H.2.*



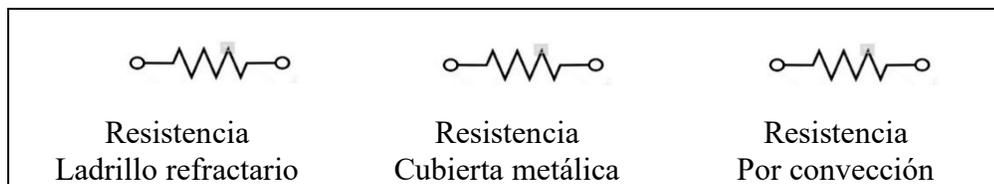
De la figura anterior se puede destacar lo siguiente:

- **T1:** Temperatura de la pared interior del horno (°C)
- **T2:** Temperatura de ladrillo refractario (°C)
- **T3:** Temperatura exterior del horno (°C)
- **Ta:** Temperatura ambiental (°C)

En la figura 37 se presentan las resistencias térmicas que se utilizan para analizar la transferencia de calor por unidad de longitud en las paredes planas.

**Figura 37.**

*Resistencias térmicas en el horno H. 2.*



**Fuente:** Elaboración propia

### **3.1.7.6. Coeficiente de transferencia de calor por convección para horno H. 2**

Para calcular el coeficiente de transferencia de calor por convección para paredes planas, se requiere primero encontrar la temperatura de película utilizando una expresión matemática.

Dado el valor de la temperatura ambiente de 11.2 °C (284.35 °K) y el valor de la temperatura del material refractario 2 de 40 °C (313.15 °K), se puede determinar lo siguiente:

$$T_p = \frac{284.35^{\circ}K + 313.15^{\circ}K}{2}$$

$$T_p = 298.7^{\circ}k$$

**Tabla 22.***Propiedades del aire a la temperatura de película.*

Temperatura [°K]	Viscosidad cinemática [m <sup>2</sup> /s]	Conductividad térmica [W/m°K]	Difusividad térmica [m <sup>2</sup> /s]	Constante de Prandtl
298.75	15.62 x 10 <sup>-6</sup>	25.51 x 10 <sup>-3</sup>	21.41 x 10 <sup>-6</sup>	0.7296

**Fuente:** Elaboración propia

- **Cálculo del número de Rayleigh**

Para calcular el número de Rayleigh, se utiliza la siguiente ecuación, donde se conocen el valor de la gravedad 9,81 m/s<sup>2</sup>, la temperatura de salida (313 K), la temperatura ambiente (11.2 °C o 284.35 K), la altura del horno (0.235 m), y el valor de la viscosidad cinemática, es de 15,62 x 10<sup>-6</sup> (m<sup>2</sup>/s) según la tabla 22, Esto nos lleva a obtener lo siguiente:

$$R_a = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_a) \cdot L^3}{\nu \cdot \alpha}$$

$$R_a = \frac{9.8 \frac{m}{s^2} \cdot 0.00311948 \cdot (298.7 - 284.35) \cdot 0.235^3}{15.62 \times 10^{-6} \cdot 21.41 \times 10^{-6}}$$

$$R_a = 17684179.67$$

Dado que el número de Rayleigh resultante es mayor que 10<sup>8</sup>, se clasifica como un flujo turbulento. Por consiguiente, se procede a aplicar la siguiente ecuación para calcular el valor correspondiente del Número de Nusselt:

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

En donde

- **Ra** = Numero de Rayleigh.
- **Pr** = Numero de Prandtl.

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot (17684179.67)^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{0.7296} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$Nu = 36.87$$

- **Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección**

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección, se utiliza la siguiente ecuación, obteniendo como resultado lo siguiente:

En donde:

- **$h_c$**  = Coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m<sup>2</sup>.K).
- **$Nu$**  = Numero Nusselt.
- **$K$**  = Conductividad térmica (W/m<sup>2</sup>.K).
- **$L$**  = Altura.

$$h_c = \frac{Nu \cdot k}{L}$$

$$h_c = \frac{36.87 \times 25.51 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^\circ K}}{0,235 m}$$

$$h_c = 4.00 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- **Cálculo de coeficiente de transferencia de calor por radiación**

$$h_r = 4 \cdot \varepsilon_1 \cdot \sigma \cdot T_m^3$$

En donde:

- $\sigma$  = Constante de Stefan – Boltzman =  $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$
- $\varepsilon_1$  = Emisividad del ladrillo refractario N = 0.93.
- $T_m$  = Temperatura media de T1 y T2.

La temperatura en la superficie dentro del horno a la que calentaremos se considera T1 = 962 °C el cual convertido a grados Kelvin T1 = 1235.15 K.

El clima del Cusco varía de acuerdo a la zona y se clasifica como Cwb por el sistema Koppen Geiger. La temperatura aquí es en promedio 11.2 °C. Y convirtiéndolo a grados kelvin T2 = 284.35 °K.

$$h_r = 4 \cdot (0.93) \cdot \left(5.67 \times 10^{-8} \frac{W}{m^2}\right) \cdot \left(\frac{1235.15 + 284.35}{2}\right)^3$$

$$h_r = 56.97 \frac{W}{m^2 K}$$

### 3.1.7.7. Pérdida de calor por transferencia en las paredes del horno H.2.

Las pérdidas de calor presentes en el horno de fundición de plata H. 2 se las determina a través de las 4 paredes del horno, 3 laterales y 1 superior.

- **Perdida de calor por conducción**

$$Q_{p\ Cond} = \frac{T1 - T3}{\left(\frac{e_{refra}}{k_{refra} \cdot A_{refr}}\right) + \left(\frac{e_{acero}}{K_{acero} \cdot A_{acero}}\right)}$$

En dónde:

- $Q_{p\ Cond}$  = Perdida por conducción (W)
- $T1$  = Temperatura interna del horno (°K)
- $T3$  = Temperatura en la manija metálica (°K)
- $L$  = Altura (m)
- $k_{refra}$  = Conductividad térmica de ladrillo (W/m.°K)
- $K_{manija}$  = Conductividad térmica de la manija metálica (W/m.K)
- $e_{refra}$  = Espesor del ladrillo (m)
- $e_{manija}$  = espesor de la manija metálica (m)
- $A_{refr}$  = Área del ladrillo (m<sup>2</sup>)
- $A_{manija}$  = Área de la manija (m<sup>2</sup>)

**Tabla 23.***Datos para el cálculo de pérdida de calor por conducción*

Descripción	Valores
Temperatura interna del horno	962 °C (1235.15 °K)
Temperatura de la cubierta metálica	60 °C (333.15 °K)
Altura del horno	0.235 m
Conductividad térmica del ladrillo	0.17 W/m.°K
Conductividad térmica de cubierta	16.3 W/m.°K
Espesor del ladrillo	6.5 cm (0.065 m)
Espesor de la cubierta metálica	0.00127 m
Área del ladrillo	846 cm <sup>2</sup>
Área de la cubierta metálica	846 cm <sup>2</sup>

**Fuente:** Elaboración propia

$$Q_{p \text{ cond}} = \frac{1235.15 - 333.15}{\left( \frac{0.65 \text{ m}}{0.17 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°K}} \cdot 0.0846 \text{ m}^2} \right) + \left( \frac{0.00127 \text{ m}}{16.3 \frac{\text{W}}{\text{m} \cdot \text{°K}} \cdot 0.0846 \text{ m}^2} \right)}$$

$$Q_{p \text{ cond}} = 199.54 \text{ W}$$

- **Perdida de calor por convección**

$$Q_{p \text{ conv}} = \frac{T3 - Ta}{\frac{1}{A \cdot hc}}$$

En donde:

- $Q_{p \text{ conv}}$  = Perdida por convección (W).
- $Ta$  = Temperatura ambiente (°K).

- $T_3$  = Temperatura en la chapa metálica (°K).
- $A$  = Área.
- $hc$  = coeficiente de transferencia de calor por convección (W/m. °K).

**Tabla 24.**

*Datos para el cálculo de la pérdida de calor por convección.*

Descripción	Valores
Temperatura ambiente	11.2 °C (284.35 °K)
Temperatura de la cubierta	60 °C (333.15 °K)
Área	0.0846 m <sup>2</sup>
Coeficiente de transferencia de calor por convección	4.00 W/m <sup>2</sup> .°K)

**Fuente:** Elaboración propia

$$Q_{P\ conv} = \frac{333.15 - 284.35}{\frac{1}{0.0846\ m^2 \times 4.00\ \frac{W}{m^2 \cdot ^\circ K}}}$$

$$Q_{P\ conv} = 16.514\ W$$

- **Perdida de calor por radiación**

$$Q_{P\ rad} = \frac{T_3 - T_a}{\frac{1}{A \cdot h_r}}$$

En donde:

- $Q_{P\ conv}$  = Perdida por convección (W).
- $T_a$  = Temperatura ambiente (°K).

- $T_3$  = Temperatura en la chapa metálica (°K).
- $A$  = Área.
- $h_c$  = coeficiente de transferencia de calor por radiación (W/m. °K).

**Tabla 25.**

*Datos para el cálculo de la pérdida de calor por radiación.*

Descripción	Valores
Temperatura ambiente	11.2 °C (284.35 °K)
Temperatura de la cubierta	60 °C (333.15 °K)
Área	0.0846 m <sup>2</sup>
Coeficiente de transferencia de calor por radiación	56.97 W/m <sup>2</sup> .°K)

**Fuente:** elaboración propia

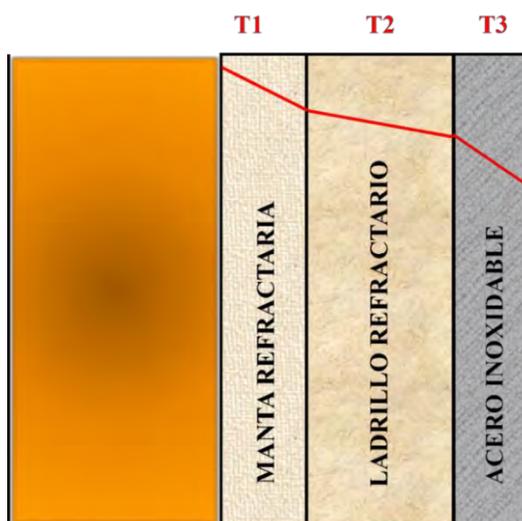
$$Q_{P \text{ rad}} = \frac{333.15 - 284.35}{\frac{1}{0.0846 \text{ m}^2 \times 56.97 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{°K}}}}$$

$$Q_{P \text{ rad}} = 235.1995 \text{ W}$$

### 3.1.7.8. Pérdida de calor por transferencia de la puerta del horno H.2

Para calcular la cantidad de calor que se pierde a través de la puerta del horno H.2, se realiza un análisis de transferencia de calor por conducción y convección, tal como se muestra en la figura siguiente:

**Figura 38.** Perfil de temperaturas en el interior de la puerta de horno del H.2.



Fuente: elaboración propia

De la figura se puede destacar lo siguiente:

- T1: Temperatura de la manta refractaria (°C)
- T2: Temperatura del ladrillo refractario (°C)
- T3: Temperatura de la cubierta metálica (°C)
- Ta: Temperatura ambiental (°C)

Se puede observar en la siguiente figura las resistencias térmicas para la evaluación de la transferencia de calor por conducción y convección en paredes planas.

**Figura 39.**

*Resistencias térmicas en la puerta del horno*

Resistencia Manta refractaria	Resistencia Ladrillo refractario	Resistencia Cubierta metálica	Resistencia convección

Fuente: elaboración propia

- **Temperatura de película**

El valor de la temperatura ambiente es de 11.2 °C (284.35 K) y el valor de la temperatura de la cubierta metálica es de 60 °C (333.15 K), se puede calcular lo siguiente:

$$T_p = \frac{284.35^\circ K + 333.15^\circ K}{2}$$

$$T_p = 308.75^\circ K$$

**Tabla 26.**

*Propiedades del aire a temperatura de película de la cubierta metálica*

<b>Temperatura (°K)</b>	<b>Viscosidad cinemática (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Conductividad térmica (W/m.°K)</b>	<b>Difusividad térmica (m<sup>2</sup>/s)</b>	<b>Constante de Prandtl</b>
308.75 °K	17.02 x 10 <sup>-6</sup>	26.62 x 10 <sup>-3</sup>	23.46 x 10 <sup>-6</sup>	0.7255

Fuente: elaboración propia

- **Cálculo de numero de Rayleigh**

Utilizando la expresión matemática para determinar el número de Rayleigh, se consideran los datos de la tabla 26:

- Gravedad que es de 9,81 m<sup>2</sup>/s
- Temperatura de salida 308.75 °K

- Temperatura ambiente que es 11.2 °C (284.35 °K)
- Altura del horno que es 0.235 m
- Valor de viscosidad cinemática que es de  $17.02 \times 10^{-6}$  (m<sup>2</sup>/s)

$$Ra = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\alpha) \cdot L^3}{V \cdot \alpha}$$

$$Ra = \frac{9.8 \frac{m}{s^2} \cdot 0.00311948 \cdot (308.75 - 284.35) \cdot 0.235^3}{17.02 \times 10^{-6} \cdot 23.46 \times 10^{-6}}$$

$$Ra = 24269289.52$$

El resultado del número de Rayleigh es mayor a  $10^8$ , lo que indica un flujo turbulento, por lo tanto, se utiliza la ecuación correspondiente para determinar el valor del número de Nusselt.

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

$$Nu = \left[ 0.825 + \frac{0.387 \cdot 24269289.52^{\frac{1}{6}}}{\left( 1 + \left( \frac{0.492}{0.7255} \right)^{\frac{9}{16}} \right)^{\frac{8}{27}}} \right]^2$$

$$Nu = 27.155$$

- **Cálculo del coeficiente de transferencia de calor por convección**

Para determinar el coeficiente de transferencia de calor por convección se aplica la ecuación que se tiene como resultado lo siguiente.

$$h_c = \frac{27.155 \times 26.62 \times 10^{-3} \frac{W}{m \cdot ^\circ K}}{0,235 m}$$

$$h_c = 3.076 \frac{W}{m^2 \cdot K}$$

- **Perdida de calor por conducción**

De acuerdo con la figura 340 se puede determinar el valor de la pérdida de calor por conducción por medio de la expresión matemática

**Figura 40.**

*Cubierta de la puerta del horno eléctrico H.2*



**Fuente:** Elaboración propia

$$Q_{p\ Cond} = \frac{T1 - T3}{\left(\frac{e_{manta}}{k_{manta} \cdot A_{manta}}\right) + \left(\frac{e_{refract}}{K_{refract} \cdot A_{refract}}\right) + \left(\frac{e_{acero}}{k_{acero} \cdot A_{acero}}\right)}$$

$$Q_{p\ Cond} = \frac{1235.15 - 33.15}{\left(\frac{0.03\ m}{0.068\ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.0784\ m^2}\right) + \left(\frac{0.065}{0.17\ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.0784\ m^2}\right) + \left(\frac{0.0027}{16.3\ \frac{W}{m \cdot ^\circ K} \cdot 0.0784\ m^2}\right)}$$

$$Q_{p\ Cond} = 85.86\ w$$

- **Perdida de calor por convección**, Considerar datos de la tabla 27:

$$Q_{p\ conv} = \frac{T3 - Ta}{\frac{1}{A \cdot hc}}$$

En donde:

- $Q_{p\ conv}$  = Perdida de calor por convección (W)
- $Ta$  = Temperatura ambiental ( $^\circ K$ )
- $T3$  = Temperatura de la cubierta metálica ( $^\circ K$ )
- $A$  = Área ( $m^2$ )
- $hc$  = Coeficiente de transferencia de calor por convección ( $W/m \cdot ^\circ K$ )

**Tabla 27.**

*Datos para el cálculo de la perdida de calor por convección.*

Descripción	Valores
Temperatura ambiente	60 $^\circ C$ (333.15 $^\circ K$ )
Temperatura de la cubierta metálica	11.2 $^\circ C$ (284 $^\circ K$ )

Área	0.0784 m <sup>2</sup>
Coefficiente de transferencia de calor por convección	3.076 W/m <sup>2</sup> °K

---

Fuente: elaboración propia

$$Q_{P \text{ conv}} = \frac{333.15 \text{ }^\circ\text{K} - 284.35 \text{ }^\circ\text{K}}{\frac{1}{0.0784 \text{ m}^2 \cdot 3.076 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \cdot \text{ }^\circ\text{K}}}}$$

$$Q_{P \text{ conv}} = 11.769 \text{ W}$$

- **Perdida de calor total en el horno eléctrico H.2**

Este valor se calcula sumando todas las pérdidas de calor previamente estimadas, teniendo en cuenta las cuatro paredes del horno.

$$Q_{p \text{ total}} = 4_{\text{pared}}(Q_{P \text{ Cond}} + Q_{P \text{ conv}}) + 2_{\text{pared}}(Q_{P \text{ cond.puert}} + Q_{P \text{ conv.puert}})$$

$$Q_{p \text{ total}} = 4(199.54 + 16.514)W + 2(85.86 W + 11.769 W)$$

$$Q_{p \text{ total}} = 1.059474 \text{ kW}$$

### 3.1.7.9. Energía total en el horno eléctrico H.2

Para determinar la cantidad de calor necesaria para la fundición de plata, incluyendo las pérdidas en el horno eléctrico H.2, se establece un tiempo de operación de 45 minutos y se evalúa mediante un balance energético (figura 41) de la siguiente manera:

$$Q_{\text{total}} = Q_{\text{Fundicion}} + Q_{P \text{ total}}$$

Donde:

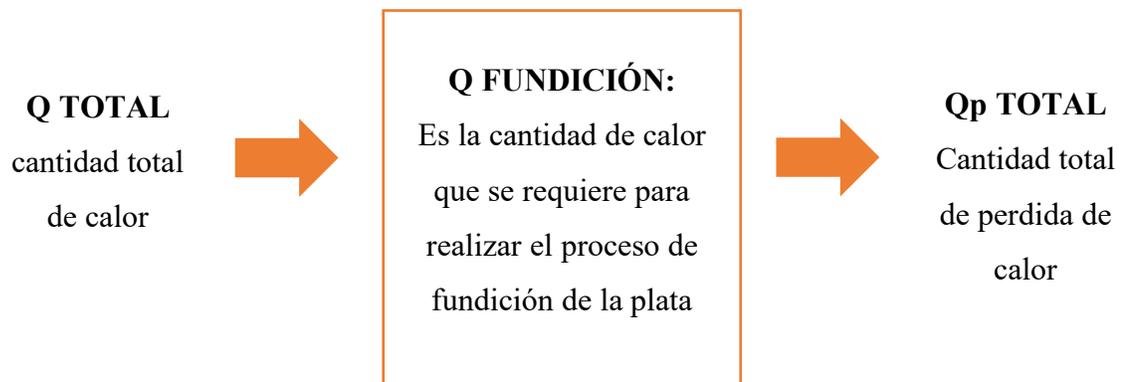
- $Q_{Fundicion} = 0.11218 \text{ kW}$
- $Q_{P total} = 1.05947 \text{ kW}$

$$Q total = 0.1123 \text{ kW} + 1.0595 \text{ kW}$$

$$Q total = 1.1717 \text{ kW}$$

**Figura 41.**

*Balace de energía en el horno*



**Fuente:** Elaboración propia.

***Cantidad de calor suministrado***

Se procede a calcular la cantidad de calor que suministra la fuente calorífica a partir de la energía eléctrica para llevar a cabo el proceso de fundición de la plata, por lo tanto, se aplica la Ley de Joule.

$$Q_s = I^2 \times R \times T$$

En donde:

- $Q_s$  = Cantidad de calor suministrado (kJ)

- **I** = Intensidad de corriente eléctrica (A)
- **R** = Resistencia eléctrica (A)
- **T** = tiempo (s)

Para identificar la energía calorífica, es necesario conocer la potencia eléctrica, temperatura de alimentación, temperatura de ejecución y resistividad del horno eléctrico utilizado en las pruebas experimentales, el cual se muestra en la tabla 28:

**Tabla 28.**

*Datos para el cálculo de suministro de energía*

Potencia eléctrica	Tensión de alimentación	Temperatura de ejecución °T	Resistividad
1765.49 W	220 V	1000 °C	3.43 Ω

**Fuente:** Roger B. Achahui, Romulo G. Achahui, Diseño y fabricación de un módulo de casting, p. 112

El valor del poder calorífico que emite la corriente eléctrica se determina a partir de la potencia eléctrica que es de 1765.49 W y la intensidad de corriente depende del voltaje que es de 220 V y tiempo que corresponde a 45 min, en donde se obtiene el siguiente resultado.

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1765.49 \text{ W}}{220 \text{ V}} = 8.02 \text{ A}$$

Por la Ley de Joule:

$$Qs = I^2 \times R \times T$$

$$Qs = 8.02^2 \times 3.43 \times 45 \text{ min}$$

$$Q_s = 9.928 \text{ kW}$$

### 3.1.7.10. Rendimiento del horno eléctrico H.2

A continuación, determinamos el rendimiento del horno eléctrico H.2, para esto lo calculamos utilizando la siguiente expresión matemática.

$$\eta = \frac{Q_s - Q_{total}}{Q_s} \times 100\%$$

$$\eta = \frac{9.928 \text{ kW} - 1.172 \text{ kW}}{9.928 \text{ kW}} \times 100\%$$

$$\eta = 80.20 \%$$

## CAPITULO IV

### ANALISIS DE RESULTADOS

#### 4.1. Introducción del capítulo

Es fundamental considerar diversos criterios, evaluaciones y resultados basados en pruebas físicas de fundición, la resolución de ecuaciones matemáticas y el desarrollo de graficas de estadísticas que justifiquen el análisis técnico en los diferentes tipos de hornos utilizados para la fundición de plata (Ag).

Este capítulo se centra en analizar los resultados obtenidos, detallando los fundamentos científicos e interpretando los valores térmicos de los hornos de crisol H.1 y de resistencia eléctrica H.2 para la fundición de plata.

#### 4.2. Análisis de los resultados

A continuación, se realiza una comparación entre los resultados obtenidos en el capítulo anterior sobre el horno de crisol a gas H.1 y el horno eléctrico de mufla H.2. El horno H.1, que contiene cemento refractario con manta o fibra refractaria y una pared externa de acero inoxidable, se compara con el horno H.2, que presenta ladrillo refractario.

En la tabla 29, se describe el horno de crisol para la fundición de plata H.1, incluyendo: el tipo de fuente calorífica, la cantidad de calor requerido por la plata, la cantidad de calor que requiere el crisol, el tiempo de fundición, la cantidad de calor necesaria para la fundición del metal, la pérdida de calor por conducción, radiación, convección y aberturas, las pérdidas totales, la energía necesaria para fundir la plata, la cantidad de calor que genera el horno y su rendimiento.

La tabla 30 detalla de manera similar los indicadores del horno eléctrico para la fundición de plata H.2, sustentando así la comparación entre ambos hornos. Esta comparación permite realizar un análisis energético comparativo, identificando ventajas y desventajas para concluir el proyecto de investigación.

**Tabla 29.**

*Descripción de los resultados obtenidos del horno de crisol a gas H.1.*

Horno de crisol a gas H.1	
Descripción	Valor
<i>Fuente calorífica</i>	GLP
<i>Cantidad de calor requerido por la plata</i>	24.016 kJ
<i>Cantidad de calor requerido por el crisol</i>	283.30 kJ
<i>Tiempo de fusión</i>	52 min
<i>Cantidad de calor para la fusión del metal</i>	0.098 kW
<i>Perdida de calor por conducción por la pared</i>	1204.25 W
<i>Perdida de calor por convección por la pared</i>	112.72 W
<i>Perdida de calor por conducción por la tapa</i>	181.30 W
<i>Perdida de calor por convección por la tapa</i>	20.369 W
<i>Pérdida total de calor</i>	1.720 kW
<i>Energía total necesaria para fundir la plata</i>	1.818 kW
<i>Cantidad de calor suministrado</i>	9.702 kW
<i>Rendimiento</i>	81.26 %

**Fuente:** Elaboración propia.

**Tabla 30.***Descripción de los resultados obtenidos del horno eléctrico H.2*

<b>Horno eléctrico H.2</b>	
<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Fuente calorífica	Energía eléctrica
Cantidad de calor requerido por la plata	23.692 kJ
Cantidad de calor requerido por el crisol	279.20 kJ
Tiempo de fusión	45 min
Cantidad de calor para la fusión del metal	0.1123 kW
Perdida de calor por conducción por la pared	199.54 W
Perdida de calor por convección por la pared	16.514 W
Perdida de calor por conducción por la puerta	85.86 W
Perdida de calor por convección por la puerta	11.769 W
Pérdida total de calor	1.0595 kW
Energía total necesaria para fundir la plata	1.1717 kW
Cantidad de calor suministrado	9.928 kW
Rendimiento	88.20 %

**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.2.1. Cantidad de temperatura y tiempo requerida para la fundición de la plata**

##### **4.2.1.1. Horno de fundición H.1 (Horno de crisol)**

Para el horno de crisol a gas empleado en la fundición de plata, se calculó el tiempo de fundición en relación con la temperatura de colada, tomando en cuenta el dato específico de fundición de la plata, que es de 962 °C. Estos datos se presentan en la siguiente tabla 31:

**Tabla 31.**

*Tabla de promedio de datos obtenidos para el horno H.1*

<b>Descripción</b>	<b>Datos obtenidos</b>
Temperatura máxima de fusión de la colada °C	1120 °C
Temperatura de fusión de la plata °C	962 °C
Tiempo de fusión de la plata Ag	52 min
Masa de Ag (gr)	68.84 gr

**Fuente.** Elaboración propia

#### **4.2.1.2. Horno de fundición H.2 (Horno eléctrico)**

Para el horno eléctrico empleado en la fundición de plata, se calculó el tiempo de fundición en función de la temperatura de colada, tomando en cuenta el valor específico de fundición de la plata, que es de 962 °C. Estos datos se presentan en la siguiente tabla 32:

**Tabla 32.**

*Tabla de promedio de datos obtenidos para el horno H.2*

<b>Descripción</b>	<b>Datos obtenidos</b>
Temperatura máxima de fusión de la colada °C	1100 °C
Temperatura de fusión de la plata 960 °C	960 °C
Tiempo de fusión de la plata Ag	45 min
Masa de Ag (gr)	68.84 gr

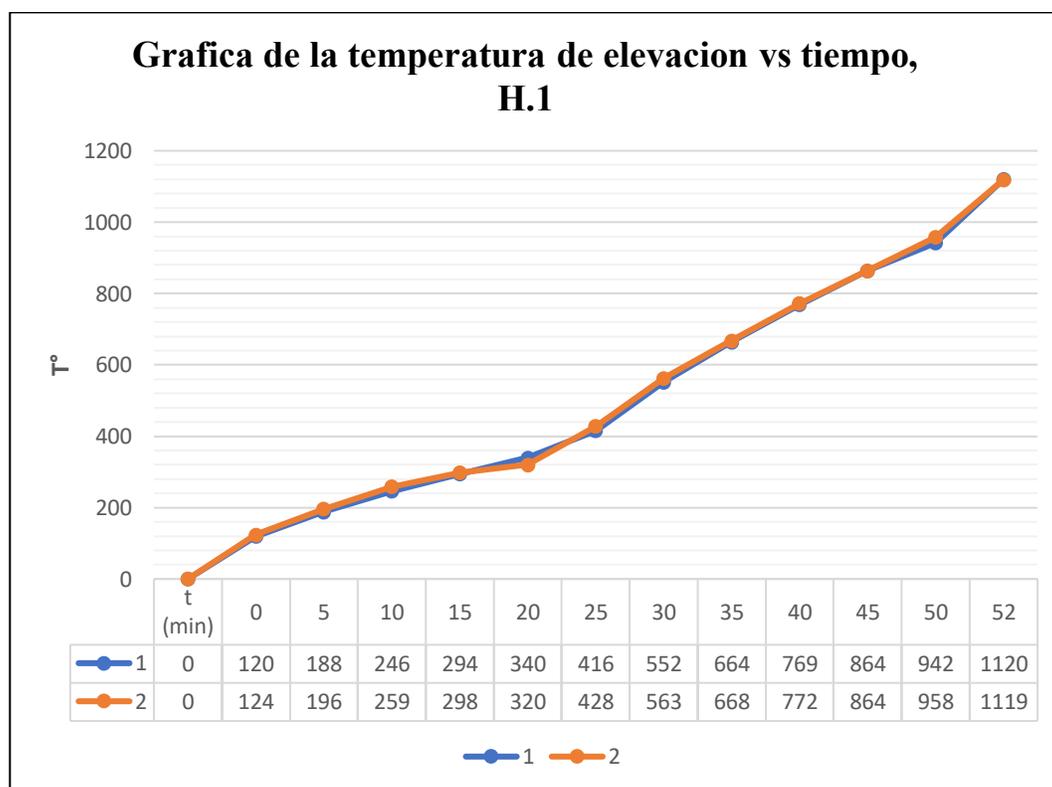
### 4.2.1.3. Análisis de Cantidad de temperatura y tiempo requerida para la fundición de la plata

Durante el proceso de fundición de la plata en los hornos H.1 y H.2, en la figura 42 y 43 se observa un aumento gradual de la temperatura con respecto al tiempo de fundición. Este incremento comienza con un precalentamiento inicial, como se muestra en los gráficos siguientes:

- Elevación de la temperatura en función al tiempo H.1 (Fig. 42)

**Figura 42.**

*Graficas de la temperatura de elevación en el horno H.1 para las pruebas 1 y 2*

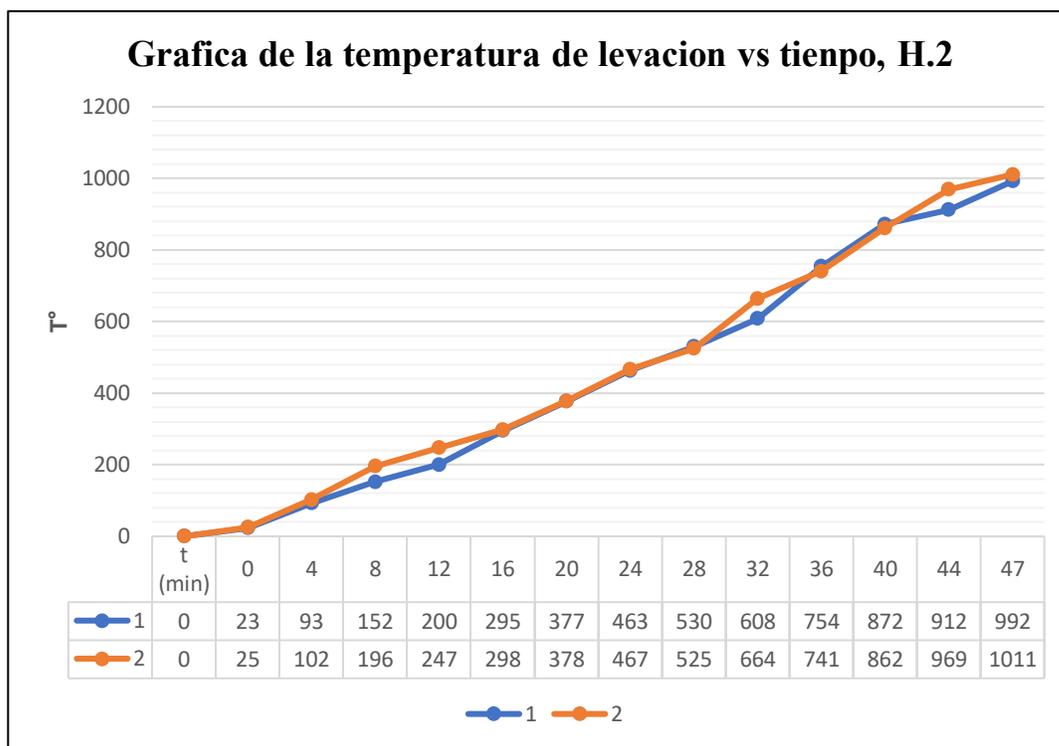


**Fuente:** Elaboración propia

- Elevación de la temperatura en función al tiempo H.2 (Fig. 43)

**Figura 43.**

*Graficas de la temperatura de elevación en el horno H.2 para las pruebas 1 y 2*



Fuente: Elaboración propia

#### 4.2.2. Cantidad de calor requerida por la plata

##### 4.2.2.1. Horno de fundición H.1 (Calor en el crisol)

Para el horno de crisol empleado en la fundición de la plata H.1, se necesita calcular la cantidad de calor necesaria para el crisol durante los 45 minutos de fundición. Los datos resultantes se presentan en la tabla 33 de la siguiente manera:

**Tabla 33.**

*Descripción del calor requerido por el crisol en el horno H.1*

Calor requerido por la plata en kJ	24.016 kJ
Tiempo	52 min = 3120 s
Calor requerido por la plata kW	$7.6974 \times 10^{-3}$ kW

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.2.2.2. Horno eléctrico H.2 (calor en la cabina)**

Para el horno eléctrico H.2, durante un período de 45 minutos (2700 segundos), se calcula la cantidad de calor en kJ y kW. Los resultados se muestran en la tabla 34 de la siguiente manera:

**Tabla 34.**

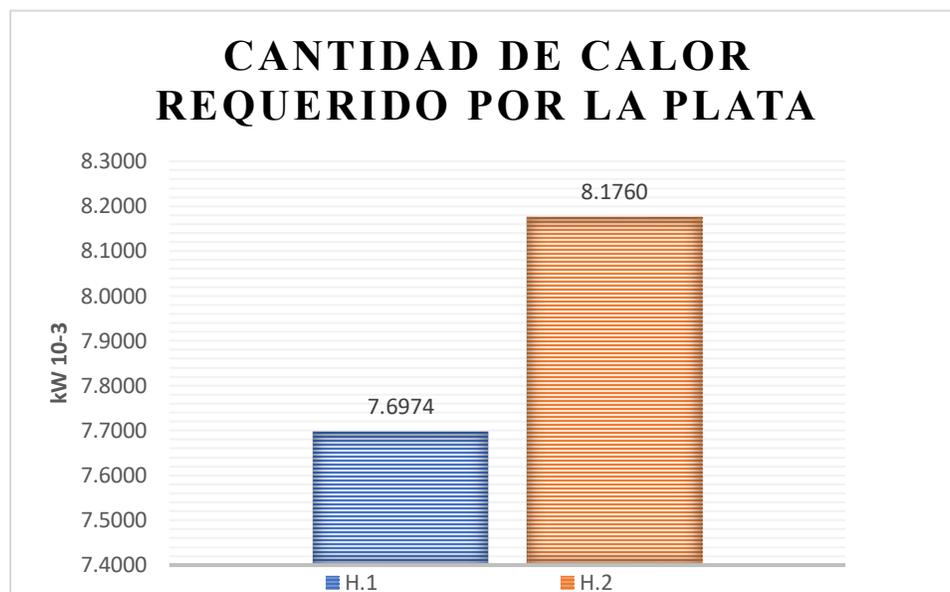
*Descripción del calor requerido por el crisol en el horno.*

Calor requerido por la plata en kJ	23.692 kJ
Tiempo	45 min = 2700 s
Calor requerido por la plata en kW	$8.176 \times 10^{-3}$ kW

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.2.2.3. Análisis del calor requerido**

Durante el proceso de fundición de la plata, se observa que el crisol del horno H.1 requiere de aproximadamente  $7.6974 \times 10^{-3}$  kW, mientras que el crisol del horno eléctrico H.2 necesita alrededor de  $8.176 \times 10^{-3}$  kW, Aunque estas cantidades presentan una mínima diferencia, lo cual indica que el tiempo de fundición afecta, estos datos se pueden apreciar en la figura 44.

**Figura 44.***Cantidad de calor requerido por el crisol*

Fuente: elaboración propia

**4.2.3. Cantidad de calor requerido por el crisol****4.2.3.1. Horno de crisol H.1 (Calor de crisol)**

Se necesita la siguiente cantidad de calor para el crisol del horno de crisol utilizado en la fundición de plata H.1, tomando en cuenta los 45 minutos, con los siguientes datos proporcionados en la tabla 35.

**Tabla 35.***Descripción del calor requerido por el crisol en el horno H.1.*

Calor requerido por el crisol en kJ	283.30 kJ
Tiempo	45 min = 2700 s
Calor requerido por el crisol en kW	0.1049 kW

#### 4.2.3.2. Horno eléctrico H.2 (calor de crisol)

Por otro lado, en el caso del horno eléctrico H.2, con un tiempo de 40 minutos, se genera una cantidad específica de calor, expresada tanto en kilovatios (kW) como en kilovatios-hora (kWh), con los datos proporcionados en la tabla 36.

**Tabla 36.**

*Descripción del calor requerido por el crisol en el horno H.2.*

Calor requerido por el crisol en kW	279.1998 kJ
Tiempo	45 min = 2700 s
Calor requerido por el crisol en kW	0.0958 kW

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2.4. Cantidad de calor para la fundición de plata

Después de calcular la cantidad de calor requerida tanto para la plata como para el crisol, se lleva a cabo el análisis correspondiente de la cantidad de calor necesaria para la fundición de la plata. Estos datos se encuentran detallados en la tabla 37 siguiente para los hornos de fundición H.1 y H.2.

**Tabla 37.**

*Datos obtenidos para fundición.*

Calor requerido para la fundición de la plata en el Horno H.1	0.098 kW
Calor requerido para la fundición de la plata en el Horno H.2	0.112 kW

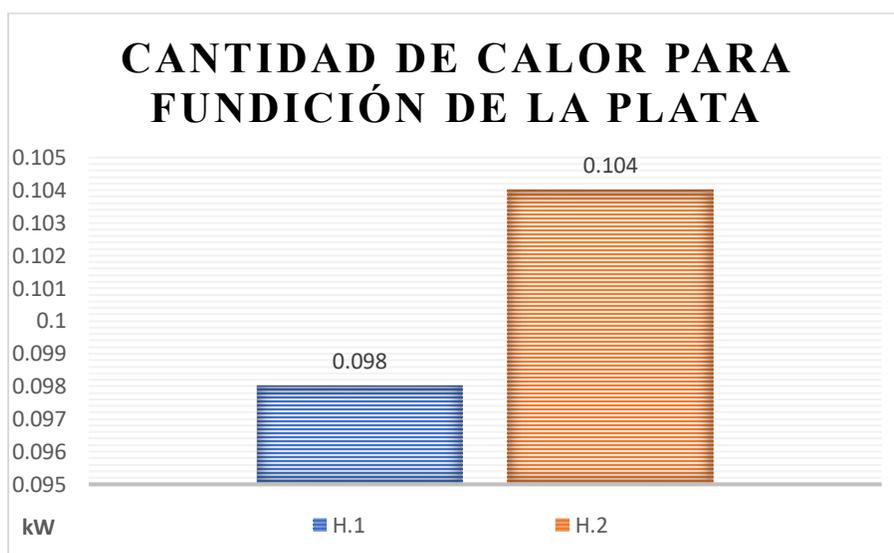
**Fuente:** elaboración propia

#### 4.2.4.1. Análisis de la cantidad de calor para la fundición de la plata

Para calcular la cantidad de calor requerida para la fusión de la plata, el horno de crisol H 1 consume 0.098 kW, mientras que el horno eléctrico H. 2 utiliza 0.104 kW. Es importante tener en cuenta que estos valores son ideales y no incluyen las pérdidas de calor. Esta información está representada en la figura 45.

**Figura 45.**

*Cantidad de calor para fundir plata*



#### 4.2.5. Pérdida de calor por conducción

##### 4.2.5.1. Horno de crisol H.1 (Pérdida de calor por conducción)

El horno de crisol H.1 está compuesto por un área cilíndrica y una pared superior, que funciona como tapa principal. Para su construcción, se emplean materiales como cemento refractario, fibra refractaria y una cubierta metálica, que actúan como aislantes térmicos. Estos detalles se encuentran reflejados en la tabla 38.

**Tabla 38.***Datos obtenidos de la pérdida de calor por convección en el horno H.1*

Perdida de calor por pared de material refractario	1204.25 W
Perdida de calor por pared de material refractario (1 super.)	1204.25 W
Perdida de calor por pared de la tapa de horno	181.3 W
Perdida de calor por pared de la tapa de horno (2 super.)	362.6 W

**Fuente:** Elaboración propia.**4.2.5.2. Horno eléctrico H.2 (pérdida de calor por conducción)**

El horno de crisol H.2 está compuesto por cuatro paredes laterales y una base. Tanto las cuatro paredes laterales como la base están construidas con ladrillo refractario, con la excepción de la puerta o tapa principal, que cuenta con una capa de manta cerámica como aislante térmico, además de ladrillo refractario y una cubierta metálica de acero inoxidable. Estos detalles se encuentran especificados en la tabla 39.

**Tabla 39.***Datos obtenidos de la pérdida de calor por convección en el horno H.2.*

Perdida de calor por pared de material refractario	199.54 W
Perdida de calor por pared de material refractario (4 paredes)	798.16 W
Perdida de calor por la pared de la puerta del horno	85.86 W
Perdida de calor por la pared de la puerta del horno (2 paredes)	171.72 W

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2.6. Pérdida de calor por convección

##### 4.2.6.1. Horno de crisol H.1 (Perdidas por convección)

A partir del área cilíndrica del horno crisol H.1, se calcula el valor de las pérdidas por convección, realizando una serie de cálculos previos que incluyen la temperatura de película, el número de Rayleigh, el número de Nusselt y el coeficiente de transferencia de calor por convección. Estos resultados se encuentran detallados en la tabla 40.

**Tabla 40.**

*Datos obtenidos de la perdida de calor por conducción en el horno H.1.*

Pérdida de calor por la pared de material refractario	112.72 W
Pérdida de calor por la pared de material refractario (1 super.)	112.72 W
Pérdida de calor por la pared de la tapa del horno	20.369 W
Pérdida de calor por la pared de la tapa del horno (2 super.)	40.738 W

**Fuente:** Elaboración propia.

##### 4.2.6.2. Horno de fundición H.2 (Perdida por convección)

En el horno eléctrico H. 2 de igual manera se desarrollaron los mismos cálculos precedentes para determinar el valor de las pérdidas por convección, detallados en la tabla 41.

**Tabla 41.**

*Datos de la perdida de calor por conducción en el horno H.2.*

Pérdida de calor por la pared de material refractario	16.514 W
Pérdida de calor por pared de material refractario (4 paredes)	66.056 W
Pérdida de calor por la pared de la puerta del horno	11.769 W
Pérdida de calor por la pared de la puerta del horno (2 paredes)	23.538 W

#### 4.2.7. Pérdida total de calor

##### 4.2.7.1. Horno de crisol H.1 (pérdidas totales)

La cantidad total de calor perdido por el horno de crisol H.1 es la suma de las pérdidas por convección y las pérdidas por conducción. Esto se presenta en detalle a continuación en la tabla 42.

**Tabla 42.**

*Datos obtenidos de la perdida de calor total en el horno H.1.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Perdida de calor total	1.720 kW

**Fuente:** Elaboración propia.

##### 4.2.7.2. Horno eléctrico H.2 (pérdidas totales)

En el horno eléctrico H.2, las pérdidas por abertura no son tomadas en cuenta, por lo que el valor total es la suma de las pérdidas por convección y las pérdidas por conducción. Esto resulta en el valor detallado en la tabla 43.

**Tabla 43.**

*Datos obtenidos de la perdida de calor total en el horno H.2.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Perdida de calor total	1.0595 kW

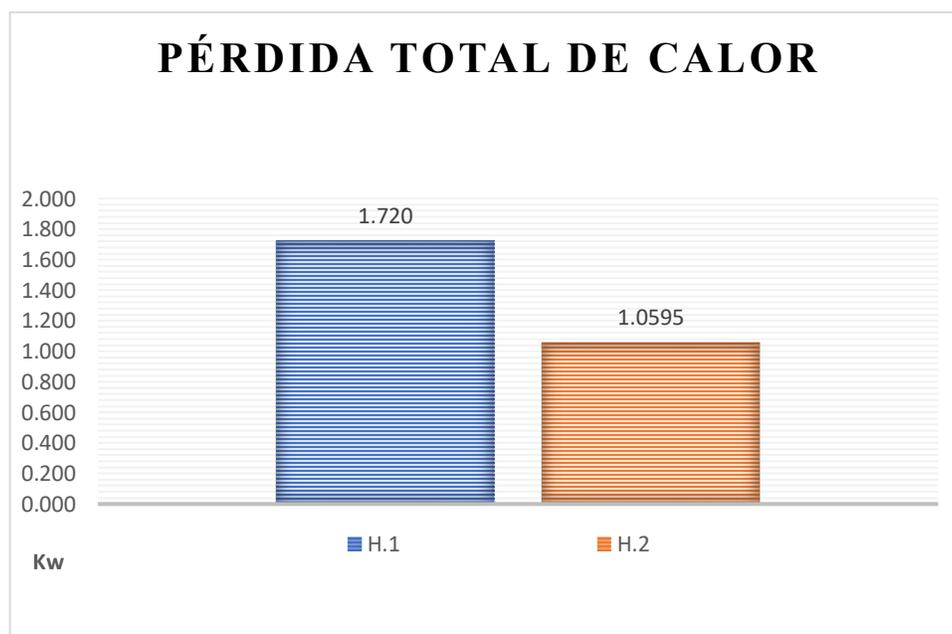
**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2.7.3. Análisis de las pérdidas totales

Como se observa en la figura 46, existe una mínima diferencia en las pérdidas de calor entre los dos hornos de crisol y de resistencia eléctrica. Esta diferencia radica por el tipo de material refractario que posee el horno H.2 (ladrillos refractarios), mientras que el horno de crisol H. 1 posee alrededor de sus paredes cemento refractario incluido una manta cerámica permitiendo que el calor no se escape, considerando que en ambos hornos no existe aberturas.

**Figura 46.**

*Pérdida total de calor.*



**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2.8. Energía total para la fundición de la plata

##### 4.2.8.1. Horno de crisol H.1 (Energía total requerida)

Para calcular la energía mínima requerida por el horno de crisol H.1 para llevar a cabo el proceso de fundición de plata, considerando las pérdidas de calor por convección, conducción y

aberturas, es esencial sumar las pérdidas totales junto con la cantidad de calor necesaria para fundir la plata y el crisol. Este procedimiento se realiza mediante una ecuación detallada a continuación en la tabla 44.

**Tabla 44.**

*Datos obtenidos de la energía total requerida en el horno H.1.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Energía total requerida	1.818 kW

**Fuente:** Elaboración propia.

**4.2.8.2. Horno eléctrico H.2 (Energía total requerida)**

En el caso del horno eléctrico H.2, también se llevó a cabo la suma de las pérdidas totales, junto con la cantidad de calor necesaria para la plata y el crisol, con el fin de determinar el total de energía requerida por el horno para llevar a cabo el proceso de fundición de plata. Este valor se calculó utilizando una ecuación específica, y los detalles se presentan en la tabla 45.

**Tabla 45.**

*Datos obtenidos de la energía total requerida en el horno H.2.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Energía total requerida	1.172 kW

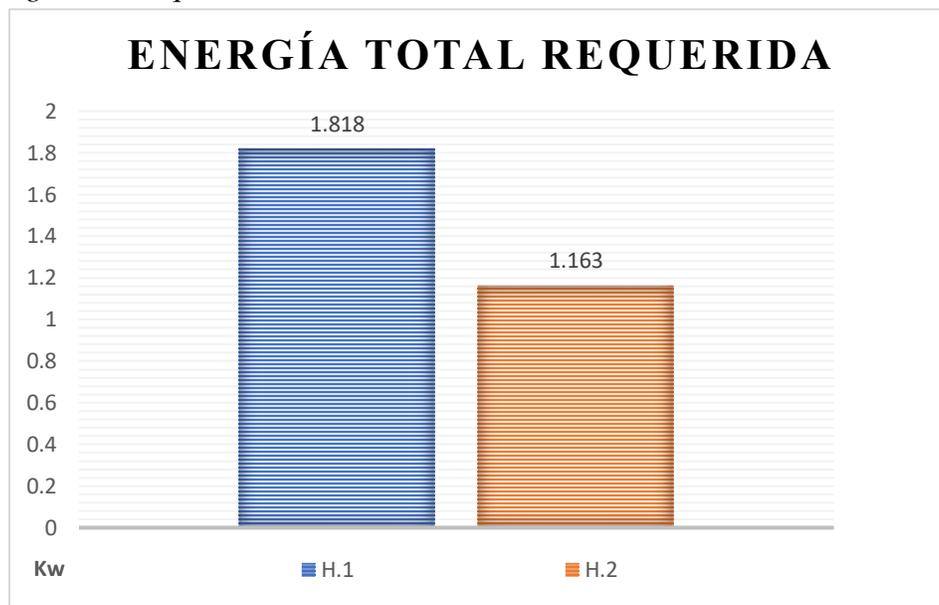
**4.2.8.3. Análisis de la energía total requerida**

La figura 47 muestra un análisis gráfico que indica que el horno de crisol H.1 requiere 1.818 kW para llevar a cabo el proceso de fundición de plata, en contraste, el horno eléctrico H.2

necesita 1.163 kW. Esto implica que el horno H.1 requiere una cantidad menor de calor, esto sucede por el tipo de cubierta refractaria utilizada en ambos hornos.

**Figura 47.**

*Energía total requerida.*



**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.2.9. Cantidad de calor suministrado por la fuente de calorífica**

##### **4.2.9.1. Horno de crisol H.1 (Calor suministrado)**

Sabemos que el horno de crisol H.1 se alimenta de gas GLP, con una masa de 10 kg durante un período de 52 minutos. Al aplicar la ecuación correspondiente, podemos calcular la cantidad de calor suministrada por el horno, obteniendo el siguiente resultado el cual detalla en la siguiente tabla 46:

**Tabla 46.**

*Datos obtenidos de la cantidad de calor que suministra el horno H.1.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Tiempo	52 min = 3120 s
Calor suministrado kW	9.702 kW

**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.2.10. Horno eléctrico H.2 (Calor suministrado)**

En el caso del horno eléctrico H.2, se utiliza energía eléctrica como fuente de calor, durante un período de 45 minutos. Por lo tanto, el valor del calor suministrado por el horno, calculado mediante la ecuación correspondiente, se presenta en detalle en la siguiente tabla 47.

**Tabla 47.**

*Datos obtenidos de la cantidad de calor que suministra el horno H.2.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Tiempo	45 min = 2700 s
Calor suministrado en kW	9.928 kW

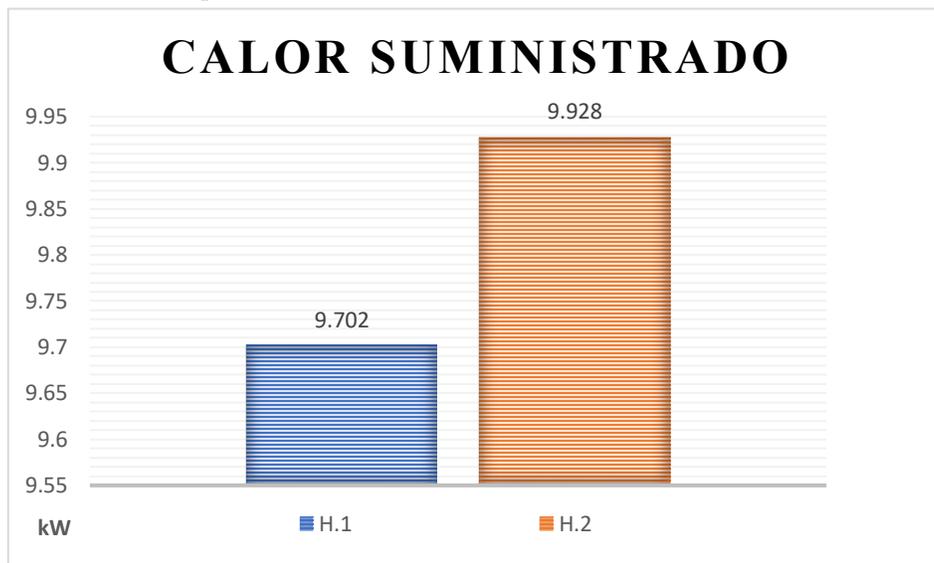
**Fuente:** Elaboración propia.

#### **4.2.10.1. Análisis del calor suministrado por los hornos**

Según lo indicado en la figura 48, el horno eléctrico H.2 proporciona una cantidad de calor de 9.928 kW, mientras que el horno de crisol H.1 suministra 9.702 kW. Esta ligera diferencia se debe al tiempo de fundición de la plata proporcionado por cada horno.

**Figura 48.**

*calor suministrado por los hornos.*



**Fuente:** Elaboración propia

#### **4.2.11. Rendimiento**

##### **4.2.11.1. Horno de fundición H.1 (Rendimiento)**

El rendimiento del horno de crisol H.1 fue calculado utilizando una expresión matemática que considera la relación entre la diferencia de calor suministrado por el horno y la energía total requerida. Los valores resultantes se detallan en la tabla 48.

**Tabla 48.**

*Datos obtenidos de la perdida de calor total en el horno H.1.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Rendimiento	0.8125
	81.25 %

**Fuente:** Elaboración propia

#### 4.2.11.2. *Horno eléctrico H.2 (Rendimiento)*

Del mismo modo al relacionar las variables mencionadas anteriormente, pero con los datos obtenidos del horno eléctrico H.2 se puede detallar lo siguiente en la tabla 49:

**Tabla 49.**

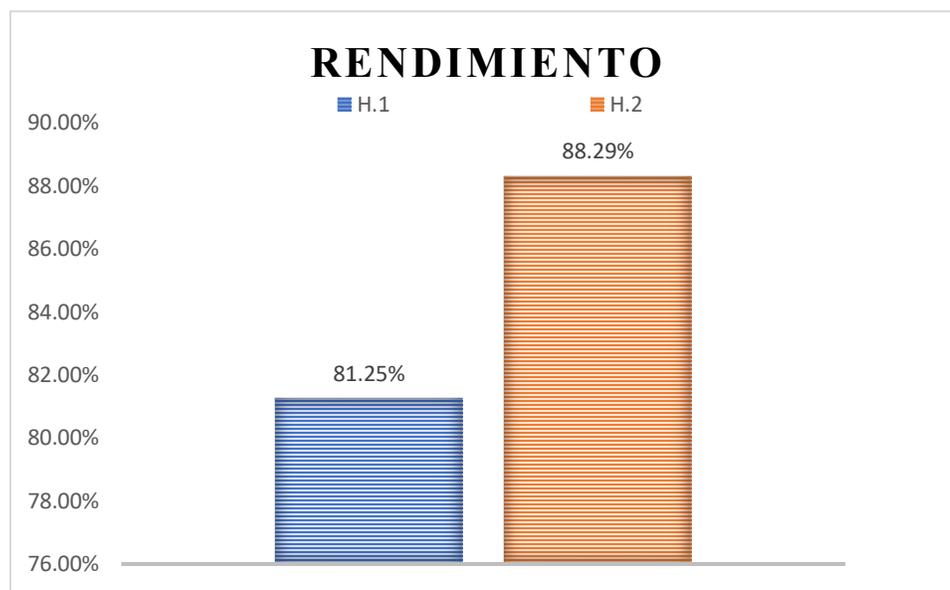
*Datos obtenidos de la pérdida de calor total en el horno H.2.*

<b>Descripción</b>	<b>Valor</b>
Rendimiento	0.8129
	88.20 %

**Fuente:** Elaboración propia.

#### 4.2.11.3. *Análisis del rendimiento*

La figura proporciona un análisis gráfico de los rendimientos asociados a los hornos de crisol H.1 y H.2. Se observa que, debido al mayor tiempo de fundición, el horno de crisol H.1 tiene un rendimiento bajo de 81.25%, mientras que el horno eléctrico H.2 exhibe un rendimiento del 88.29%. Esta diferencia es significativa, especialmente considerando que el diseño del horno H.2 incorpora materiales refractarios y no cuenta con aberturas.

**Figura 46.***Rendimiento.***Fuente:** Elaboración propia.

### 4.3. Valoraciones de la investigación

#### 4.3.1. Valoración técnica de operación de los hornos H.1 y H.2

- En el funcionamiento del horno de crisol a gas (H.1) se logró identificar una ventaja adicional para el uso de este horno, el cual puede ser utilizado también para la fundición de metales como por ejemplo el cobre, bronce y aleaciones, considerando una producción de joyas a gran escala. Ya que dicho horno sobrepasa los límites máximos de temperatura adecuada que es de 1000 °C, temperatura que puede ser muy bien aprovechada no solo para fundir, sino también para el secado de moldes y demás funciones.
- El horno eléctrico (H.2), gracias a su eficiencia y diseño estructural nos permite tener una clara versatilidad en cuanto a su uso, que indica que no solo puede ser útil para la

fundición, sino también puede tener un uso exclusivo para pruebas de laboratorio o casting, secado de moldes, des encerado de moldes y demás funciones.

#### **4.3.2. Valoración económica de los hornos H.1 y H.2**

- El uso de GLP en el horno de crisol (H.1) implica un relativo costo operativo, consumiendo 1.8 Kg de gas en 52 minutos, lo que equivale a un promedio de 6 a 10 soles, por colada, considerando algunas pérdidas durante la operación. Por esta razón, es recomendable realizar la fundición en grandes volúmenes para maximizar el aprovechamiento del poder calorífico del horno y reducir costos.
- El uso de energía eléctrica en el horno (H.2) tiene un costo considerable, con un consumo de 2 soles lo que refiere a un consumo energético de 0.928 Kw/h, según Osinergmin. Sin embargo, este costo es proporcional a la utilización del horno, ya sea para fundir metal o para secar moldes. Por lo tanto, la eficiencia depende del tipo de operación a realizar.
- La diferencia de los costos de adquisición del horno eléctrico (H.2), oscila entre los S/ 28000, frente al costo de fabricación del horno de crisol (H.1) de aproximadamente S/ 5000.00, el cual es una ventaja que a futuro tiene relevancia en el rendimiento técnico del horno.

#### **4.3.3. Valoración en seguridad y medio ambiente de los hornos H.1 y H.2**

- Estos hornos son necesario que cumpla con el ISO 13500 –, norma que habla de los hornos, equipamientos asociados a seguridad y el sistema de protección.
- En la manipulación de ambos hornos se emite calor que calienta a la manija o la carcasa metálica y que podrían generar quemaduras en la piel, para evitar este tipo de riesgos es

necesario el uso de los EPPS adaptados a trabajos en caliente como los procesos de fundición.

- La emisión de gases tóxicos a causa de la fundición de los metales es una gran tarea que aún se sigue trabajando, el horno eléctrico tiene una gran ventaja a cuanto a la reducción de la emisión de gases tóxicos.

#### **4.4. Ventajas y desventajas en el uso de ambos hornos**

Para la verificación y la determinación de las ventajas y desventajas del horno de crisol a gas y de resistencia eléctrica, se consideró desde el funcionamiento de cada horno hasta la determinación de los resultados, se detalla en la siguiente tabla 50.

**Tabla 50.****Tabla de ventajas y desventajas**

<b>Horno de crisol a gas</b>	<b>Horno de resistencia eléctrica</b>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene un uso variado para la fundición de metales, se puede fundir en gran proporción plata, cobre y bronce</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiene un uso exclusivo para la fundición de metales, se puede fundir en menor proporción oro y plata</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso de gas licuado de petróleo (GLP) en el horno de crisol, tiene un costo elevado, calculado en 52 minutos de uso, lo cual equivale a un gasto de entre 6 y 8 soles. Por esta razón, se recomienda realizar fundiciones en grandes cantidades para maximizar el poder calorífico del horno y, de esta manera, hacer más eficiente y rentable el uso del GLP.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• El uso de la energía eléctrica para el horno tiene un costo bajo, específicamente 45 minutos de uso equivalen a 2 soles. Sin embargo, este costo es proporcional al uso que se le dé al horno, ya sea para fundir metal o para secar moldes. Esto sugiere que, aunque el costo inicial es bajo, el gasto total dependerá de la cantidad y tipo de uso del horno.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para el control de la temperatura, se recurre directamente a la manipulación del pirómetro digital de 2000 °C.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para el control de la temperatura, se tiene la pantalla digital de programación de la temperatura que ya está incorporado en dicho horno.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Uso exclusivo para fundir bronce y secado de moldes de arcilla refractaria.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Regular costo en el tema de mantenimiento.</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bajo costo en tema de mantenimiento</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se puede adaptar hasta los 1500 °C</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Se adapta hasta los 1800 °C</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de adquisición promedio de 20000 a</li> </ul>
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Costo de adquisición de 5000 a 20000 soles.</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 30000 soles.</li> </ul>

## CONCLUSIONES

- Después de realizar el análisis tecnológico comparativo entre los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para la fusión de plata, se concluye que los hornos de resistencia eléctrica son más eficientes, con un rendimiento del 88.29%, superando el rendimiento del horno de crisol a gas, que es del 81.25%.
- Tras analizar cómo influye el tiempo de fusión en los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para fundir plata, se encontró un tiempo de fusión de 45 min para el horno de resistencia eléctrica y de 52 min para el horno de crisol a gas en el proceso de la fusión de 68.98g de plata.
- La temperatura de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica influyen significativamente en la eficiencia y el rendimiento del proceso de fundición de plata. Ambos hornos superaron el punto de fusión de la plata (962 °C), alcanzando temperaturas máximas de 1120 °C para el horno de crisol a gas y 1100 °C para el horno eléctrico.
- En cuanto a la energía calorífica, el horno eléctrico (H.2) requiere una cantidad total de calor de 1.112 kW para la fundición de la plata, con una pérdida de calor de 1.059 kW. En comparación con el horno de crisol a gas (H.1), que requiere un total de 1.818 kW de calor y presenta una pérdida de calor de 1.720 kW.

## RECOMENDACIONES

- En el uso de los hornos de crisol a gas H.1, debemos tener cuidado que estos cuenten con las diferentes capas de aislantes para que de esa forma la conservación de calor durante la fundición sea efectiva y además que el secado y el sinterizado de hornos nuevos de este tipo debe ser efectivo.
- La eficiencia térmica del horno de crisol H.1, es útil para otro tipo de materiales como cobre o bronce, ya que estos materiales tienen mayor punto de fusión y son usados en gran proporción para diferentes tipos de artesanías dentro de nuestra región.
- Utilizar las expresiones matemáticas planteadas e innovar la aplicación de un software (ANSYS), como metodologías para futuras investigaciones o diseños en construcción en donde se requiera el cálculo de parámetros fundamentales del proceso de fundición de metales y aleaciones.
- Considerar un posible estudio y diseño de quemadores con fuente de energía de GLP, con el objetivo de establecer herramientas básicas de cálculo y sus características técnicas, para los hornos de crisol porque muestran una potencialidad de optimizar dicho proceso comenzando con un buen secado de la bóveda de refractario y quemador adecuado a la capacidad del horno.
- Se recomienda el uso del horno eléctrico debido a su alta eficiencia y bajo costo de consumo energético. Además, el horno eléctrico ofrece condiciones seguras para su manipulación, lo que convierte en una opción favorable tanto en términos económicos como de seguridad.

## REFERENCIA BIBLIOGRÁFICA

### LIBROS

- Astigarraga, J. (1995). *Hornos Industriales de Resistencias*. Colombia: McGraw Hill.
- Berniti J. (2017) *Notas técnicas. calidad de refractarios*, Recuperado de, [http:// Revista del Idiem](http://Revista del Idiem).
- Castells E., (2017), *Tratamientos y valoración energética de residuos*, Ecuador, Pearson educación.
- Calvo, C. S. (2015). *Hornos utilizados en la fabricación de aleaciones ferrosas y no ferrosas*. Scientia.
- Cengel, Y. A. (2007). *Transferencia de Calor y Masa*. Mexico: McGraw Hill.
- Sampieri H. (2014), *Metodología de la investigación 6ta edición*, Mexico, Interamericana editores S.A.
- International, A. (2008). *ASM handbook:Materials Park*. Ohio, Estados unidos: ASM International.

### TESIS

- Flores, E, & Orellana, R. (2014). *Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas*. San salvador: Universidad del Salvador.
- Julio, B. (1993). *Resistencia de materiales teoría y práctica*. Xalapa: México: Universidad Veracruzana.

### PAGINAS WEB

- Aliaga, L. (2018). *Repositorio Institucional Universidad Mayor de San Andres*. Recuperado el octubre de 2023, de <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/18779>

- Arnaldo N. *Universidad Central Marta Abreu de las Villa*. Recuperado de <https://dspace.uclv.edu.cu/items/5d74adb1-5d76-4a98-8318-156196a6a50b>
- Aquima, W. & Carlos, D.D. (2022). *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco - Repositorio Institucional*. Recuperado el Octubre de 2023, de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/6508>
- Biset S. & Ferreyra M. (2013), *Artículo de cálculo de eficiencia de hornos*, Extraído de, [https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04\\_025/papers/04a/04a\\_1406\\_538.pdf](https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/04a/04a_1406_538.pdf)
- Borda, D. (2006). *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco - Repositorio Institucional*. Recuperado el Octubre de 2023, de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/6508>
- Cabrera, D. E., & Morales, J. M. (2019). *Repositorio - UPN*. Recuperado el Octubre de 2023, de <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/22376>
- Elemento de la plata, [https://www.quimica.es/enciclopedia/Plata.html#google\\_vignette](https://www.quimica.es/enciclopedia/Plata.html#google_vignette)
- Espasa C. *Laminas de hornos metalurgicos*, Extraído de, <https://biblio.ie/book/lamina-espasa-17886-tipos-hornos-metalurgicos/d/1454804586>
- Flores Garcia, E. Y. (2014). *Universidad de El Salvador Sistema Bibliotecario*. Recuperado el octubre de 2023, de <https://ri.ues.edu.sv/id/eprint/6320>
- Física de fluidos y termodinámica. Recuperado de <https://mauriciomedinasierra.wordpress.com/segundo-corte/conceptos/calor/calor-latente/tabla-de-calor-latente/>
- Guesi, A. N. (2019). *DSpace UCLV*. Recuperado el octubre de 2023, de <https://dspace.uclv.edu.cu/server/api/core/bitstreams/6ed527cc-cb28-4d9e-bd16-26d3306b2dd2/content>
- Harbison & Walker (2005), *Handbook of Refractory Practice*, Canada, Second edition

- Huillca, R.B. & Huillca, R.G. (2022). *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco - Repositorio Institucional*. Recuperado el Octubre de 2023, de <http://hdl.handle.net/20.500.12918/6357>
- Julio Sh. (2005). *hornos metalurgicos*, Extraído de, [http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmI/10-Hornos\\_industriales.pdf](http://recursosbiblio.url.edu.gt/Libros/2013/cmI/10-Hornos_industriales.pdf)
- Osinerming (2024), *Ficha tecnica de regulacion tarifaria*, Extraído de, [https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04\\_025/papers/04a/04a\\_1406\\_538.pdf](https://www.aaiq.org.ar/SCongresos/docs/04_025/papers/04a/04a_1406_538.pdf)
- Pérez, F.J. & Soto A.E. (2009). *Academia*. Recuperado el Octubre de 2023, de [https://www.academia.edu/8082546/DISEÑO\\_CÁLCULO\\_Y\\_CONSTRUCCIÓN\\_DE\\_UN\\_HORNO\\_DE\\_FUNDICIÓN\\_DE\\_ALUMINIO\\_TIPO\\_BASCULANTE\\_Y\\_SUS\\_MOLDES](https://www.academia.edu/8082546/DISEÑO_CÁLCULO_Y_CONSTRUCCIÓN_DE_UN_HORNO_DE_FUNDICIÓN_DE_ALUMINIO_TIPO_BASCULANTE_Y_SUS_MOLDES)
- Pillaca, R. (2021). *PUCP - Repositorio*. Recuperado el Octubre de 2023, de <http://hdl.handle.net/20.500.12404/7776>
- Lobato, A. & Landauro, A. (1985), *Hornos Metalúrgicos Industriales*, Lima - Perú, editorial San Marcos.
- S.A., T. (2005). *Repositorios de Latinoamericanos*. Recuperado el Octubre de 2023, de <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/3653889?show=full>
- Sandemeyer Steel company, (2021), *Propiedades del acero Inox AISI 310*, Extraído de, <https://dtesteel.com>
- Suntaxi, E.E. & Torres, C.D. (2014). *Universidad Politecnica Salesiana Ecuador*. Recuperado el Octubre de 2023, de <https://dspace.ups.edu.ec/handle/123456789/7226>
- Viloche J. (2019), *Tomado de Gas natural propiedades y uso*, extraído de. <https://www.ipeperu.net>

# **ANEXOS**

## Anexo 1. Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLES	MÉTODOLOGIA
<p><b>PROBLEMA GENERAL</b></p> <p>¿Cuál de las dos tecnologías de horno será más eficiente, para fundir aleaciones de plata en las joyerías de la región Cusco?</p> <p><b>PROBLEMAS ESPECIFICOS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• ¿Como afecta el tiempo de fusión en la tecnología de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica, durante el proceso de fundición de plata?</li> <li>• ¿Cómo influye la temperatura de fusión en la tecnología de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica, durante el proceso de fundición de la plata?</li> <li>• ¿Cómo afecta la pérdida de calor, dentro de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para la fundición de la plata?</li> </ul>	<p><b>OBJETIVO GENERAL</b></p> <p>Comparar cuál de las dos tecnologías de horno, es más eficiente y adecuada para la fusión de plata en las joyerías de la región del Cusco.</p> <p><b>OBJETIVO ESPECIFICO</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Analizar cómo el tiempo de fusión afecta a la tecnología de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica en el proceso de fundición de plata.</li> <li>• Evaluar cómo la temperatura del horno influye en la tecnología del horno de crisol a gas y de resistencia eléctrica para fundir plata</li> <li>• Analizar el impacto de la pérdida de calor dentro de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica para fundir plata.</li> </ul>	<p><b>HIPOTESIS GENERAL.</b></p> <p>La tecnología del horno de crisol a gas es más eficiente y adecuada para la fusión de plata en las joyerías de la región del Cusco, en comparación con los hornos de resistencia eléctrica.</p> <p><b>HIPOTESIS ESPECÍFICAS</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• El tiempo de fusión tiene un impacto diferencial dentro de la tecnología del horno, mostrando al horno de crisol con una mayor sensibilidad a las variaciones en el tiempo de fusión, en comparación con el horno de resistencia eléctrica.</li> <li>• La temperatura del horno afecta de manera distinta en la fundición de plata, mostrando al horno de resistencia eléctrica con una mayor estabilidad y control de las temperaturas en comparación con el horno de crisol</li> <li>• La pérdida de calor afecta de manera significativa al proceso de fundición de plata en el horno de resistencia eléctrica, en comparación con los hornos de crisol a gas debido a la capacidad de retención de calor y diseño estructural que tiene dicho horno.</li> </ul>	<p><b>DEPENDIENTE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficiencia del horno de fusión</li> </ul> <p><b>INDEPENDIENTE</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tiempo de fusión</li> <li>• Temperatura del horno</li> <li>• Perdida de calor</li> </ul>	<p><b>TIPO DE INVESTIGACION</b></p> <p>La investigación tecnológica es de tipo cuantitativo, por que consiste en el estudio, análisis y control de las variables del tiempo de fusión, colada y temperatura de los hornos para fundir plata y sus aleaciones.</p> <p><b>NIVEL DE INVESTIGACION</b></p> <p>El nivel de investigación será de grado explicativo de comparación, de manera que la tesis dará a conocer las características, ventajas y desventajas de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica</p> <p><b>DISEÑO DE LA INVESTIGACIÓN</b></p> <p>El presente trabajo adquiere el diseño descriptivo comparativa que recoge información de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica, en función a las variables independientes como son el tiempo de fusión, temperatura del horno y energía calorífica que afectan a la eficiencia del horno.</p> <p><b>POBLACIÓN:</b></p> <p>Los joyeros de la región del Cusco que utilizan el horno de resistencia eléctrica o de mufla.</p> <p><b>MUESTRA:</b></p> <p>los joyeros de la región del Cusco que se dedican a la joyería en la especialidad de fusión de plata</p> <p><b>TECNICAS DE RECOLECCION DE DATOS</b></p> <p>La técnica empleada en este proyecto, va relacionada bajo especificaciones y recomendaciones de diseño mecánico, procesos de manufacturas y transferencia de calor. Haciendo una verificación de las variables extraídas en las fuentes de datos. Con respecto al tiempo y temperatura de fusión, se utilizará el control estadístico en tablas.</p>

## Anexo 2. Operacionalización de variables

<b>Variable nominal</b>	<b>Definición</b>	<b>Unidad de medida</b>	<b>Indicador</b>	<b>Rango</b>	<b>Técnica e Instrumento de medición</b>
<b>Variable dependiente</b>					
Rendimiento térmico	La eficiencia térmica de horno de la fundición direcciona a cómo optimizar la fusión, la transferencia y la dosificación del metal para alcanzar un éxito sostenible de la fundición	%	Porcentaje de rendimiento	0 - 100	-Ensayos de fundición -Cálculos de rendimiento, medición de la energía térmica en grados Celsius, análisis de poder calorífico.
<b>Variables independientes</b>					
Tiempo de fusión	Periodo de duración para cambio de estado del material	Min	Tiempo de fundición de la, plata	0.20 – 1	Control del tiempo de fusión con el uso de un cronometro.
Temperatura del horno	Medida de calor (°C) o energía térmica concentrada.	°C	Grado de la temperatura	0 - 1120	Control de la temperatura de fusión usando un pirómetro
Perdida de calor	Propiedad de los materiales que valora la capacidad de transmitir el calor (Q) a través de ellos.	kW	Energía calorífica	0 - 150	Cálculo el valor de energía calorífica mediante modelos matemáticos.

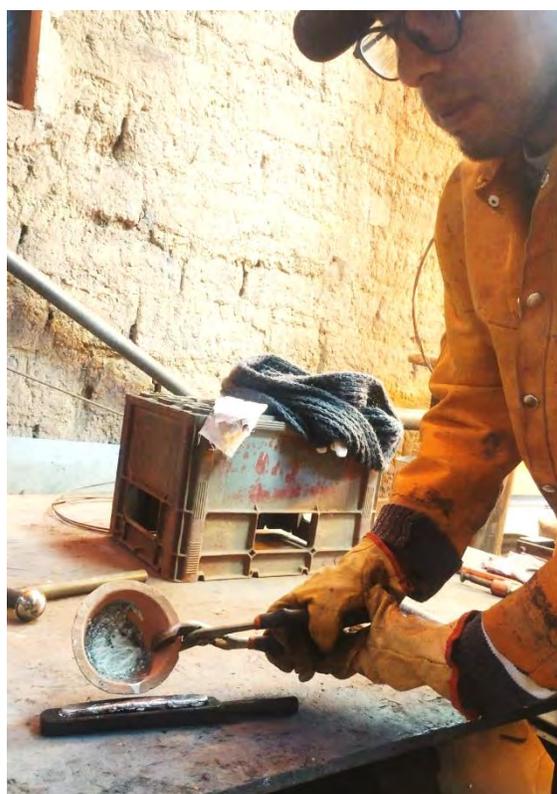
Anexo 3. Preparación del horno de crisol a gas H.1

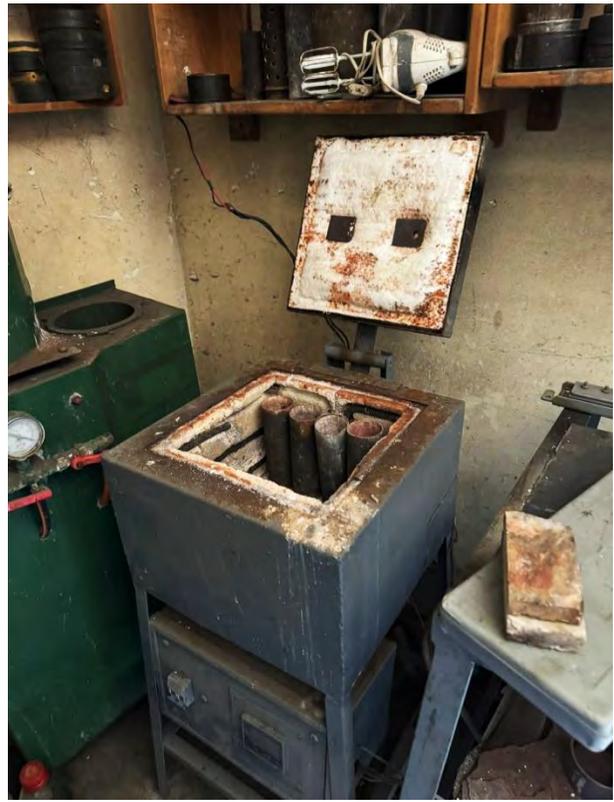


Anexo 4. Etapa de calentamiento y control de la temperatura en el de crisol a gas H.1



**Anexo 5:** Colado de la plata fundida en la lingotera del horno de crisol a gas H.1



**Anexo 6. Verificación y operación del horno de resistencia eléctrica H.2**

**Anexo 7. Determinación del peso de la plata y del crisol**

**Anexos 8. Elaboración y precalentamientos de moldes para el horno H.2**

**Anexo 9. Obtención de la plata fundida en horno eléctrico H.2**

## Anexo 10. Ficha técnica del cemento refractario

### FICHA TÉCNICA

# ULTRA 70

## Concreto Refractario

Refractarios Nacionales, una empresa del Grupo Morgan Advanced Materials



### Descripción

Concreto refractario altamente calificado por la Industria Azucarera. Recomendado para aplicaciones severas en donde se requiere resistencia al ataque químico.

### Características

Temperatura límite recomendada de uso de 1520 °C.  
 Instalación por vaciado  
 Fraguado al aire  
 Alta densidad

### Aplicaciones

Este producto es aplicado en la cara caliente de hornos y calderas que utilicen gas propano o biomasa como combustible, en donde la temperatura no supere el límite recomendado.

Tener en cuenta que todos los datos se basan en probetas de prueba y pueden variar de acuerdo al diseño de los componentes. Los datos contenidos en la ficha técnica son provistos únicamente como guía.

### Propiedades físicas

Densidad aparente, g/cm <sup>3</sup> :		1.71
Agua requerida, % del peso a preparar:		17
Densidad nominal,		
▪ A la temperatura límite de uso,	kg/m <sup>3</sup>	1648-1850
	lb/pie <sup>3</sup> :	103-116
Módulo de ruptura (ASTM C 133-84)		
▪ Secado 18 – 24 h a 110 °C,	psi:	350-650
	MPa:	2.4-4.5
▪ Cocido 5 horas a 815 °C,	psi:	400-700
	MPa:	2.8-4.8
▪ A la temperatura límite de uso,	psi:	500-900
	MPa:	3.4-6.2
Resistencia a la compresión en frío (ASTM C 133-84)		
▪ Secado 18 – 24 h a 110 °C,	psi:	1100-1800
	MPa:	7.6-12.4
▪ Cocido 5 horas a 815 °C,	psi:	1200-2000
	MPa:	8.3-13.7
▪ A la temperatura límite de uso,	psi:	2000-3000
	MPa:	13.7-20.7
Cambio lineal permanente (ASTM C 113-93), %		
▪ Secado 18 – 24 h a 110 °C		0 a -0.2
▪ Cocido 5 horas a 815 °C		-0.1 a -1.0
▪ A la temperatura límite de uso		-1.0 a 1.0
Conductividad térmica, Btu*in/h*ft <sup>2</sup> **F (ASTM C 417)		
▪ Temperatura media	a 260°C/500°F	7.3
	a 540°C/1004°F	7.3
	a 815°C/1500°F	7.5
	a 1095°C/2003°F	7.7

### Composición química

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	55.00
SiO <sub>2</sub> , %	36.00
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> , %	1.1
CaO, %	7.49
MgO, %	0.39
K <sub>2</sub> O, %	Trazas
Na <sub>2</sub> O, %	Trazas
TiO <sub>2</sub> , %	Trazas

### Contenido por bolsa, lb

50

[www.morganadvancedmaterials.com](http://www.morganadvancedmaterials.com)

Refractarios Nacionales S.A., Km. 34.5 Autopista Palín, Palín Esquintla. Tel. (502) 79563400

## Anexo 11. Propiedades del aire de 1 atm de presión

860  
APÉNDICE 1

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	$8.036 \times 10^{-6}$	$1.189 \times 10^{-5}$	$5.837 \times 10^{-6}$	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	1002	0.02057	$1.356 \times 10^{-5}$	$1.527 \times 10^{-5}$	$1.008 \times 10^{-5}$	0.7436
-30	1.451	1004	0.02134	$1.465 \times 10^{-5}$	$1.579 \times 10^{-5}$	$1.087 \times 10^{-5}$	0.7425
-20	1.394	1005	0.02211	$1.578 \times 10^{-5}$	$1.630 \times 10^{-5}$	$1.169 \times 10^{-5}$	0.7408
-10	1.341	1006	0.02288	$1.696 \times 10^{-5}$	$1.680 \times 10^{-5}$	$1.252 \times 10^{-5}$	0.7387
0	1.292	1006	0.02364	$1.818 \times 10^{-5}$	$1.729 \times 10^{-5}$	$1.338 \times 10^{-5}$	0.7362
5	1.269	1006	0.02401	$1.880 \times 10^{-5}$	$1.754 \times 10^{-5}$	$1.382 \times 10^{-5}$	0.7350
10	1.246	1006	0.02439	$1.944 \times 10^{-5}$	$1.778 \times 10^{-5}$	$1.426 \times 10^{-5}$	0.7336
15	1.225	1007	0.02476	$2.009 \times 10^{-5}$	$1.802 \times 10^{-5}$	$1.470 \times 10^{-5}$	0.7323
20	1.204	1007	0.02514	$2.074 \times 10^{-5}$	$1.825 \times 10^{-5}$	$1.516 \times 10^{-5}$	0.7309
25	1.184	1007	0.02551	$2.141 \times 10^{-5}$	$1.849 \times 10^{-5}$	$1.562 \times 10^{-5}$	0.7296
30	1.164	1007	0.02588	$2.208 \times 10^{-5}$	$1.872 \times 10^{-5}$	$1.608 \times 10^{-5}$	0.7282
35	1.145	1007	0.02625	$2.277 \times 10^{-5}$	$1.895 \times 10^{-5}$	$1.655 \times 10^{-5}$	0.7268
40	1.127	1007	0.02662	$2.346 \times 10^{-5}$	$1.918 \times 10^{-5}$	$1.702 \times 10^{-5}$	0.7255
45	1.109	1007	0.02699	$2.416 \times 10^{-5}$	$1.941 \times 10^{-5}$	$1.750 \times 10^{-5}$	0.7241
50	1.092	1007	0.02735	$2.487 \times 10^{-5}$	$1.963 \times 10^{-5}$	$1.798 \times 10^{-5}$	0.7228
60	1.059	1007	0.02808	$2.632 \times 10^{-5}$	$2.008 \times 10^{-5}$	$1.896 \times 10^{-5}$	0.7202
70	1.028	1007	0.02881	$2.780 \times 10^{-5}$	$2.052 \times 10^{-5}$	$1.995 \times 10^{-5}$	0.7177
80	0.9994	1008	0.02953	$2.931 \times 10^{-5}$	$2.096 \times 10^{-5}$	$2.097 \times 10^{-5}$	0.7154
90	0.9718	1008	0.03024	$3.086 \times 10^{-5}$	$2.139 \times 10^{-5}$	$2.201 \times 10^{-5}$	0.7132
100	0.9458	1009	0.03095	$3.243 \times 10^{-5}$	$2.181 \times 10^{-5}$	$2.306 \times 10^{-5}$	0.7111
120	0.8977	1011	0.03235	$3.565 \times 10^{-5}$	$2.264 \times 10^{-5}$	$2.522 \times 10^{-5}$	0.7073
140	0.8542	1013	0.03374	$3.898 \times 10^{-5}$	$2.345 \times 10^{-5}$	$2.745 \times 10^{-5}$	0.7041
160	0.8148	1016	0.03511	$4.241 \times 10^{-5}$	$2.420 \times 10^{-5}$	$2.975 \times 10^{-5}$	0.7014
180	0.7788	1019	0.03646	$4.593 \times 10^{-5}$	$2.504 \times 10^{-5}$	$3.212 \times 10^{-5}$	0.6992
200	0.7459	1023	0.03779	$4.954 \times 10^{-5}$	$2.577 \times 10^{-5}$	$3.455 \times 10^{-5}$	0.6974
250	0.6746	1033	0.04104	$5.890 \times 10^{-5}$	$2.760 \times 10^{-5}$	$4.091 \times 10^{-5}$	0.6946
300	0.6158	1044	0.04418	$6.871 \times 10^{-5}$	$2.934 \times 10^{-5}$	$4.765 \times 10^{-5}$	0.6935
350	0.5664	1056	0.04721	$7.892 \times 10^{-5}$	$3.101 \times 10^{-5}$	$5.475 \times 10^{-5}$	0.6937
400	0.5243	1069	0.05015	$8.951 \times 10^{-5}$	$3.261 \times 10^{-5}$	$6.219 \times 10^{-5}$	0.6948
450	0.4880	1081	0.05298	$1.004 \times 10^{-4}$	$3.415 \times 10^{-5}$	$6.997 \times 10^{-5}$	0.6965
500	0.4565	1093	0.05572	$1.117 \times 10^{-4}$	$3.563 \times 10^{-5}$	$7.806 \times 10^{-5}$	0.6986
600	0.4042	1115	0.06093	$1.352 \times 10^{-4}$	$3.846 \times 10^{-5}$	$9.515 \times 10^{-5}$	0.7037
700	0.3627	1135	0.06581	$1.598 \times 10^{-4}$	$4.111 \times 10^{-5}$	$1.133 \times 10^{-4}$	0.7092
800	0.3289	1153	0.07037	$1.855 \times 10^{-4}$	$4.362 \times 10^{-5}$	$1.326 \times 10^{-4}$	0.7149
900	0.3008	1169	0.07465	$2.122 \times 10^{-4}$	$4.600 \times 10^{-5}$	$1.529 \times 10^{-4}$	0.7206
1 000	0.2772	1184	0.07868	$2.398 \times 10^{-4}$	$4.826 \times 10^{-5}$	$1.741 \times 10^{-4}$	0.7260
1 500	0.1990	1234	0.09599	$3.908 \times 10^{-4}$	$5.817 \times 10^{-5}$	$2.922 \times 10^{-4}$	0.7478
2 000	0.1553	1264	0.11113	$5.664 \times 10^{-4}$	$6.630 \times 10^{-5}$	$4.270 \times 10^{-4}$	0.7539

Nota: Para los gases ideales, las propiedades  $c_p$ ,  $k$ ,  $\mu$  y Pr son independientes de la presión. Las propiedades  $\rho$ ,  $\nu$  y  $\alpha$  a una presión  $P$  (en atm) diferente de 1 atm se determinan al multiplicar los valores de  $\rho$ , a la temperatura dada, por  $P$  y al dividir  $\nu$  y  $\alpha$  entre  $P$ .

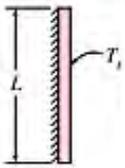
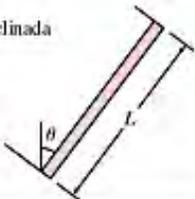
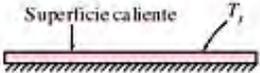
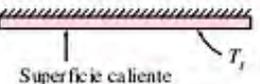
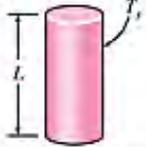
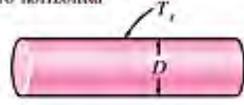
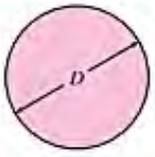
Fuente: Datos generados basándose en el software EES desarrollado por S. A. Klein y F. L. Alvarado. Fuentes originales: Keenan, Chao, Keyes, Gas Tables, Wiley, 198, y Thermophysical Properties of Matter, Vol. 3: Thermal Conductivity, Y. S. Touloukian, P. E. Uley, S. C. Saxena, Vol. 11: Viscosity, Y. S. Touloukian, S. C. Saxena y P. Hestermans, IFV Plenum, NY, ISBN 0-309067020-8.

## Anexo 12: correlaciones del número promedio de Nusselt

511  
CAPÍTULO 9

TABLA 9-1

Correlaciones empíricas del número promedio de Nusselt para la convección natural sobre superficies

Configuración geométrica	Longitud característica $L_c$	Intervalo de Ra	Nu
Placa vertical 	$L$	$10^4 - 10^9$ $10^9 - 10^{13}$ Todo el intervalo	$Nu = 0.59Ra_L^{1/4}$ (9-19) $Nu = 0.1Ra_L^{1/3}$ (9-20) $Nu = \left\{ 0.825 + \frac{0.387Ra_L^{1/4}}{[1 + (0.492/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-21) (compleja pero más exacta)
Placa inclinada 	$L$		Utilícen las ecuaciones de la placa vertical para la superficie superior de una placa fría y la superficie inferior de una placa caliente  Reemplácese $g$ por $g \cos \theta$ para $Ra < 10^9$
Plástico horizontal (Área superficial $A$ y perímetro $p$ ) a) Superficie superior de una placa caliente (o superficie inferior de una placa fría) 	$A_s/p$	$10^4 - 10^7$ $10^7 - 10^{11}$	$Nu = 0.54Ra_L^{1/4}$ (9-22) $Nu = 0.15Ra_L^{1/3}$ (9-23)
b) Superficie inferior de una placa caliente (o superficie superior de una placa fría) 		$10^5 - 10^{11}$	$Nu = 0.27Ra_L^{1/4}$ (9-24)
Cilindro vertical 	$L$		Un cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical cuando  $D \geq \frac{35L}{Gr_L^{1/4}}$
Cilindro horizontal 	$D$	$Ra_D \leq 10^{12}$	$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.559/Pr)^{1/4}]^{1/4}} \right\}^2$ (9-25)
Esfera 	$D$	$Ra_D \leq 10^{11}$ $(Pr \geq 0.7)$	$Nu = 2 + \frac{0.589Ra_D^{1/4}}{[1 + (0.469/Pr)^{1/4}]^{1/4}}$ (9-26)

## Anexo 13. Calor latente de fusión y vaporización

TABLA 20.2 Calores latentes de fusión y vaporización

Sustancia	Punto de fusión (°C)	Calor latente de fusión (J/kg)	Punto de ebullición (°C)	Calor latente de vaporización (J/kg)
Helio	-269.65	$5.23 \times 10^3$	-268.93	$2.09 \times 10^4$
Nitrógeno	-209.97	$2.55 \times 10^4$	-195.81	$2.01 \times 10^5$
Oxígeno	-218.79	$1.38 \times 10^4$	-182.97	$2.13 \times 10^5$
Alcohol etílico	-114	$1.04 \times 10^5$	78	$8.54 \times 10^5$
Agua	0.00	$3.33 \times 10^5$	100.00	$2.26 \times 10^6$
Azufre	119	$3.81 \times 10^4$	444.60	$3.26 \times 10^5$
Plomo	327.3	$2.45 \times 10^4$	1 750	$8.70 \times 10^5$
Aluminio	660	$3.97 \times 10^5$	2 450	$1.14 \times 10^7$
Plata	960.80	$8.82 \times 10^4$	2 193	$2.33 \times 10^6$
Oro	1 063.00	$6.44 \times 10^4$	2 660	$1.58 \times 10^6$
Cobre	1 083	$1.34 \times 10^5$	1 187	$5.06 \times 10^6$

Fuente: Calor latente de fusión, [http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Calor\\_y\\_Temperatura.htm](http://www.profesorenlinea.cl/fisica/Calor_y_Temperatura.htm)

**Anexo 14.** Tipos de ladrillos refractarios según su temperatura

<b>Los elementos</b>	<b>JM23</b>	<b>JM26</b>	<b>JM29</b>	<b>JM32</b>
Temperatura de servicio °C máx.	1260	1400	1550	1650
La densidad aparente g/cm <sup>3</sup> máx.	0.6	0.9	1.1.	1.15
El frío la fuerza de trituración Mpa mín.	1	1.5	3.5	4.5
P.L.C 24hrs % máx.	De ±1,5 1250°C.	-0.7 1350° C.	-0.7 1450° C.	±0.5 1550° C.
Conductividad térmica/M.k W máx.				
400° C.	0.20	0.28	0.4	0.65
600° C.	0.25	0.30	0.4	0.65
800°C	0.30	0,42	0.45	0.60
1000° C.	0.35	0.50	0.55	0.65
1200° C.	0.40	0.55	0.60	0.65
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % Mín.	35	55	55	72
Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> % máx.	1.0	1.0	1.0	1.0
SiO <sub>2</sub> % máx.	—	40	40	26

**Fuente:** Ladrillo refractario aislante de mullita JM23, [https://es.made-in-china.com/co\\_kaiyuanrefractory/product\\_Mullite-Insulating-Refractory-Brick-Jm23\\_eghniniyoy.html](https://es.made-in-china.com/co_kaiyuanrefractory/product_Mullite-Insulating-Refractory-Brick-Jm23_eghniniyoy.html)

Anexo 15: Tabla de emisividad

Material	Temperatura	$\epsilon$			
Aluminio, laminado brillante	170 °C	0,04	Caucho gris blando	23 °C	0,86
Asbestos	20 °C	0,96	Madera	70 °C	0,94
Asfalto	20 °C	0,93	Guljarro	90 °C	0,95
Algodón	20 °C	0,77	Corcho	20 °C	0,70
Hormigón	25 °C	0,93	Esmeril rojo (desigual)	80 °C	0,86
Plomo, gris oxidado	20 °C	0,26	Cámara calor, negra anodizada	50 °C	0,98
Plomo, muy oxidado	20 °C	0,26	Cobre, ligeramente mate	20 °C	0,04
Techo de fieltro	20 °C	0,93	Cobre, oxidado	130 °C	0,76
Hielo, brillante	0 °C	0,97	Cobre, pulido	20 °C	0,03
Hielo, irregular	0 °C	0,99	Cobre, negro oxidado	20 °C	0,78
Hierro, esmerinado	20 °C	0,24	Plásticos (PE, PP, PVC)	20 °C	0,94
Hierro brillante -grabado	150 °C	0,13	Hojas	20 °C	0,84
Hierro con cuero	100 °C	0,80	Mármol, blanco	20 °C	0,95
Hierro con láminas de cuero	20 °C	0,77	Recubrimiento de minio pintura	100 °C	0,93
Hierro ligeramente oxidado	20 °C	0,61	Latón, oxidado	200 °C	0,61
Hierro muy oxidado	20 °C	0,85	NATO-verde	50 °C	0,85
Tierra cultivada arada	20 °C	0,36	Papel	20 °C	0,97
Tierra, arcilla negra	20 °C	0,66	Porcelana	20 °C	0,92
Tejas	25 °C	0,93	Pizarra	25 °C	0,95
Yeso	20 °C	0,90	Pintura negra (mate)	80 °C	0,97
Vidrio	90 °C	0,94	Seda	20 °C	0,78
Oro, pulido	130 °C	0,02	Plata	20 °C	0,02
Caucho duro	23 °C	0,94	Acero (superficie tratamiento calor)	200 °C	0,52
			Acero oxidado	200 °C	0,79
			Arcilla, cocida	70 °C	0,91
			Pintura transformadora	70 °C	0,94
			Agua	38 °C	0,67
			Ladrillo, mortero, yeso	20 °C	0,93
			Zinc blanco (pintura)	20 °C	0,95

Fuente: Tabla de emisividad, [https://es.made-in-china.com/co\\_kaiyuanrefractory/product\\_Mullite-Insulating-Refractory-Brick-](https://es.made-in-china.com/co_kaiyuanrefractory/product_Mullite-Insulating-Refractory-Brick-)

Jm23\_eghninioy.html

## Anexo 16: Poder calorífico del propano comercial

### Qué es el GLP

---



El poder calorífico del Propano Comercial:

- el poder calorífico inferior (P.C.I.) es: 11.082 Kcal/Kg
- el poder calorífico superior (P.C.S.) es: 12.052 Kcal/Kg

De forma aproximada, 1 Kg. de propano equivale a la energía proporcionada por:

1,24 m<sup>3</sup> de gas natural

1,20 lt. de fuel-oil

3 m<sup>3</sup> de gas ciudad

1,30 lt. de gas-oil

3 a 6 Kg. de leña

14 kWh de electricidad

a 2 Kg. de carbón

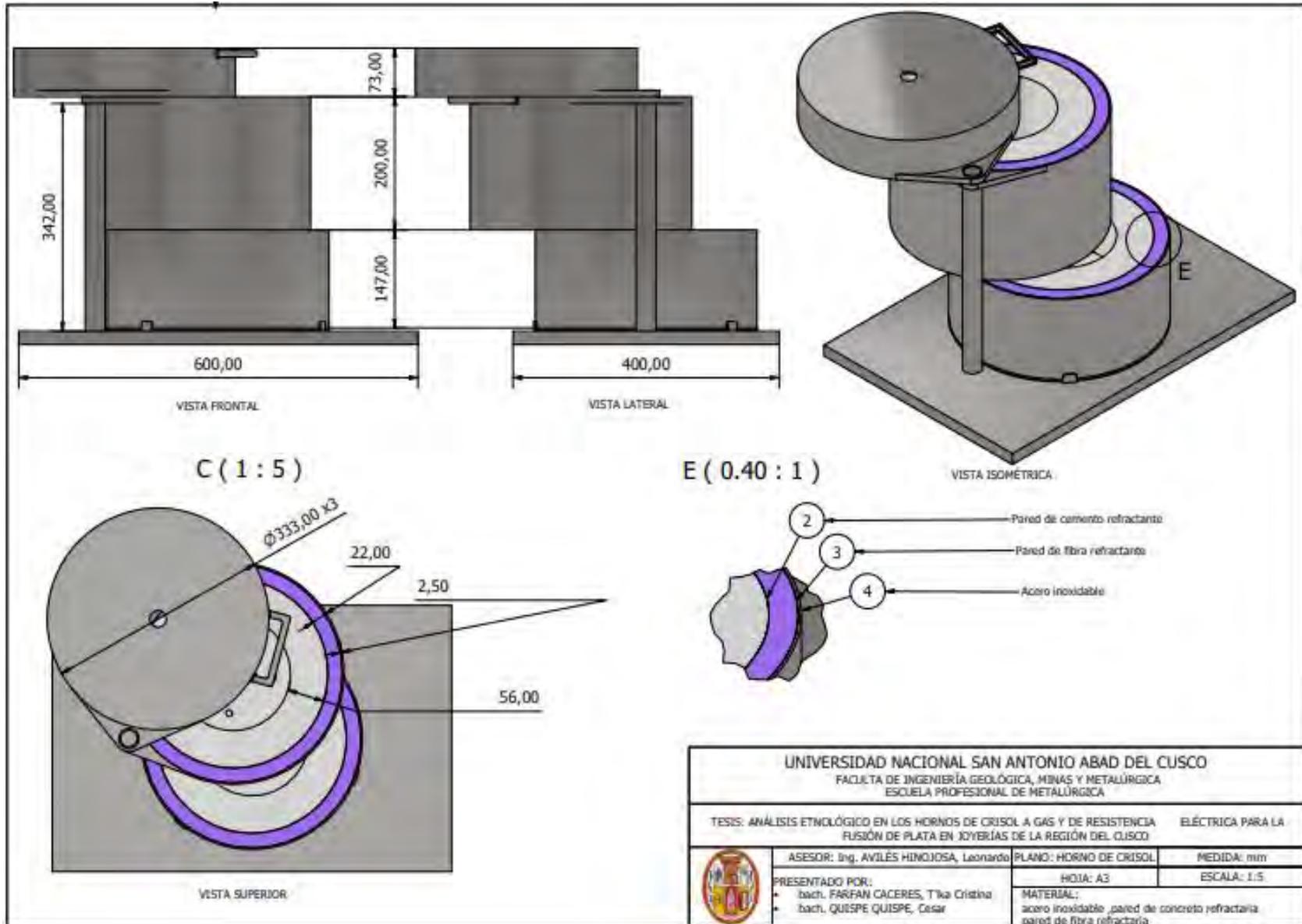
Fuente: Ministerio de Industria, Turismo y Comercio

<http://www.mityc.es/Energia/glp/Paginas/Indice.aspx>

2

Fuente: Que es el GLP, <https://slideplayer.es/slide/1102634/>

Anexo 17. Planos de medida de los hornos de crisol a gas y de resistencia eléctrica



<b>UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO</b> FACULTA DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA ESCUELA PROFESIONAL DE METALÚRGICA		
TESIS: ANÁLISIS ETNOLÓGICO EN LOS HORNOS DE CRISOL A GAS Y DE RESISTENCIA FUSIÓN DE PLATA EN JOYERÍAS DE LA REGIÓN DEL CUSCO		ELÉCTRICA PARA LA
ASESOR: Ing. AVILÉS HINOJOSA, Leonardo	PLANO: HORNO DE CRISOL	MEDIDA: mm
PRESENTADO POR: • bach. FARFAN CACERES, Tika Cristina • bach. QUESPE QUISPE, Cesar	HOJA: A3	ESCALA: 1:5
MATERIAL: acero inoxidable ,pared de concreto refractaria pared de fibra refractaria		

