

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO

FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y

METALÚRGICA

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



TESIS

**“DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN HORNO BASCULANTE PARA LA
OBTENCION DE ALEACIONES NO FERROSAS”**

PRESENTADA POR:

Br. Kida Delgado, Jorge Celso

Br. Ochoa Medina, Melvin

Para optar al Título Profesional de
Ingeniero Metalúrgico.

ASESOR:

Dr. Ing. Abel Franklin Canal Céspedes

Cusco - Perú

2023

PRESENTACIÓN

Señor Decano de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minas y Metalúrgica

Señores Docentes Honorables Miembros del Jurado:

En cumplimiento de las disposiciones del Reglamento de Grados y Títulos vigente en la Escuela Profesional de Grados y Títulos y con objeto de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, ponemos a consideración vuestra la tesis intitulada:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO BASCULANTE PARA LA OBTENCIÓN DE ALEACIONES NO FERROSAS

(Investigación - Tecnológica)

El horno de crisol basculante fue diseñado y construido ante la evidente necesidad de mejorar la calidad y el tiempo de fundición de las aleaciones no ferrosas. su ejecución tiene la finalidad de generar una visión prospectiva para mejorar dichas fundiciones.

BR. KIDA DELGADO Jorge Celso

BR. OCHOA MEDINA Melvin

DEDICATORIA

A Dios por la oportunidad de esta vida
y la fuerza de salir adelante a pesar de las
dificultades de la vida.

A mis padres que me acompañan y sin escatimar
esfuerzo alguno, han sacrificado gran parte de su
vida para formarme y educarme. A mi hermano que
siempre me acompaña, aconseja y me da su aliento.

A mi esposa por su apoyo incondicional, sus palabras de
aliento y colaboración en los momentos más necesarios
y a mis hijas Andrea y Sofía que a su corta edad han
sabido entender y aceptar el trabajo de su padre en la
elaboración de esta tesis.

A mis docentes y maestros por guiarme en el
proceso de realización de esta tesis
proporcionándome mucho de su conocimiento y
continuo apoyo moral.

Melvin Ochoa Medina

Dedico esta tesis a mi Dios y a la Virgen María por
iluminar y bendecir mi vida en todo momento

A mi padre Celso por sus enseñanzas y
experiencias; que desde el cielo me guía.

A mi madre Agripina por su amor y valores,
gracias por el apoyo en cada paso que doy y todo
momento de mi vida.

A mis padres de corazón Guillermo e Isabel por
incentivar a que siga adelante y no desfallecer

A mi esposa Flor por estar a mi lado y ser mi
compañera de vida y ser mi fortaleza y hacer de
mí una mejor persona. A mis hijos darme el mayor
motivo para alcanzar mis sueños

A mis hermanas y sobrinos por su apoyo y cariño.

A mis amigos incondicionales, gracias por
acompañarme en este camino.

Jorge Celso Kida Delgado

AGRADECIMIENTO

A la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco por darnos la oportunidad de haber cumplido una de nuestras metas y anhelos como es de optar el título de Ingeniero Metalúrgico con el trabajo de investigación intitulada:

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO BASCULANTE PARA LA OBTENCIÓN DE ALEACIONES NO FERROSAS

(Investigación - Tecnológica)

Nuestro reconocimiento al Dr. Abel F. Canal Céspedes, asesor de la presente investigación y a toda la plana docente de la **Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica** esta prestigiosa Universidad, quienes compartieron sus experiencias para el buen desenvolvimiento de nuestra formación profesional.

INDICE GENERAL

PRESENTACIÓN.....	i
DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iv
INDICE GENERAL	v
INDICE DE FIGURAS.....	x
INDICE DE TABLAS	xiii
INDICE DE ANEXOS	xiv
SIMBOLOGIA	xv
RESUMEN	xvi
ABSTRACT.....	xviii
INTRODUCCIÓN	xx
1. CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES	1
1.1 Planteamiento del problema	1
1.2 Formulación del problema	2
1.2.1 Problema general.....	2
1.2.2 Problemas específicos	2
1.3 Objetivos	3
1.3.1 Objetivo general.	3
1.3.2 Objetivos específicos.....	3
1.4 Hipotesis.....	3
1.4.1 Hipótesis General	3
1.4.2 Hipótesis específicas	3
1.5 Variables.....	4
1.5.1 Variable Independiente	4
1.5.2 Variable dependiente.....	4
1.6 Justificación.....	4
1.6.1 Desde el punto de vista ambiental.....	5
1.6.2 Desde el punto de vista tecnológico.....	5
1.6.3 Desde el punto de vista económico.....	5
1.6.4 Desde el punto de vista social.	6
1.7 Antecedentes	6
1.7.1 Nivel internacional:	6

1.7.2	Nivel nacional:	8
2.	CAPITULO II. BASES TEÓRICAS	10
2.1	Hornos	10
2.1.1	Partes del horno	10
2.2	Tipos de hornos metalurgicos	10
2.2.1	Hornos de crisol	11
2.2.2	Horno de crisol móvil.....	11
2.2.3	Horno de crisol estacionario.....	11
2.2.4	Horno de crisol basculante	12
2.3	Formas de calentamiento en los hornos de crisol.....	12
2.3.1	Métodos de calentamiento en hornos	13
2.3.2	Determinación de la temperatura por el color	15
2.4	Crisol	17
2.4.1	Tipos de crisol	17
2.4.2	Capacidad del crisol	19
2.4.3	Posición del crisol en el horno	20
2.4.4	Arranque del crisol o encendido del horno	20
2.5	Materiales refractarios.....	20
2.5.1	Propiedades de los refractarios.....	21
2.5.2	Clasificación de refractarios.....	23
2.5.3	Tipos materiales refractarios	25
2.5.4	Dimensiones comerciales de los ladrillos refractarios	26
2.5.5	Mezclas refractarias.....	26
2.5.6	Características del material refractario.....	27
2.5.7	Factores de desgastes en materiales refractarios	28
2.5.8	Aislantes refractarios o materiales termoaislantes.	31
2.6	Materiales metalicos.....	31
2.7	Transferencia de calor	32
2.8	Principales formas de transferencia de calor.....	33
2.8.1	Por conducción.....	33
2.8.2	Por convección	42
2.8.3	Por radiación	44
2.9	Conductividad termica	47

2.10	Difusividad termica	49
2.11	Procesos de combustión	51
2.11.1	Tipos de combustión	52
1.1.1	Formacion de la llama	56
2.12	Calentamiento en hornos de fundición.....	62
2.12.1	Flujo térmico en hornos industriales	62
2.12.2	Interacción térmica en los hornos.....	63
2.13	Capacidad de calentamiento de los hornos	64
2.14	Variables que afectan el calor absorbido por la carga.....	65
2.15	Rendimiento del horno	66
2.16	Distribución de calor en los hornos.....	66
2.17	Calor perdido a través las paredes del horno.....	68
2.17.1	Funcionamiento continuo	68
2.17.2	Funcionamiento intermitente o discontinuo.....	68
2.18	Calor perdido por el escape de gases a través de las puertas.	71
2.19	Calor sensible expulsado del horno en los gases de combustión.	72
2.20	Calor perdido por combustión incompleta.	72
3.	CAPITULO III: METODOLOGÍA	73
3.1	Tipo de investigación	73
3.2	Nivel y método de la investigación	73
3.3	Diseño de la investigación.....	74
3.4	Metodologia de la investigación	74
3.4.1	Identificación del problema.....	75
3.4.2	Revisión de la bibliografía	75
3.4.3	Formulación de hipótesis	75
3.4.4	Recopilación de datos.....	75
3.4.5	Análisis de datos.....	75
3.4.6	Conclusiones y recomendaciones:	75
3.5	Enfoque del diseño	76
4.	CAPITULO IV. DISEÑO DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION DEL HORNO.....	79
4.1	Diseño del horno	79
4.2	Propuesta del diseño.....	79
4.3	Descripcion de la propuesta	80

4.3.1	Requerimientos del diseño.....	82
4.3.2	Parámetros de diseño.....	82
4.4	Selección de materiales.....	83
4.4.1	Crisol.....	83
4.4.2	Ladrillo refractario.....	84
4.4.3	Concreto refractario.....	85
4.4.4	Estructura metálica.....	85
4.4.5	Quemador.....	87
4.4.6	Ventilador.....	89
4.4.7	Selección combustible.....	90
4.5	Dimensionamiento del horno.....	91
4.6	Calculo de la cámara de combustion.....	93
4.6.1	Volumen físico de la cámara de combustión.....	93
4.6.2	Volumen de la cámara interior del horno.....	93
4.6.3	Cálculos de combustión.....	97
4.6.4	Balance de materia y energía.....	99
4.6.5	Cálculo de las pérdidas de calor.....	106
4.6.6	Construcción de la cámara de combustión.....	117
4.6.7	Base de la cámara.....	118
4.6.8	Cuerpo de la cámara de la cámara de combustión.....	118
4.6.9	Conformado de la cámara de combustión.....	121
4.6.10	Construcción de la tapa de retorno.....	127
4.6.11	Construcción del soporte de base del horno de crisol.....	131
4.6.12	Mecanismo de basculamiento del horno.....	134
4.6.13	Armado del quemador del horno.....	136
4.6.14	Ensamblaje del horno.....	138
4.6.15	Funcionamiento del horno.....	139
5.	CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUCIONES.....	141
5.1	Resultados del horno.....	141
5.2	Pruebas del horno.....	141
5.2.1	Pruebas de precalentamiento.....	141
5.2.2	Pruebas de funcionamiento.....	142
5.2.3	Pruebas de fusión.....	143

5.3	Interpretacion de datos	145
5.4	Comparacion de datos	146
6.	CAPITULO V. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	147
6.1	Conclusiones	147
6.2	Recomendaciones.....	148
7.	ANEXOS.....	149
8.	Bibliografia	156
9.	Libros y Tesis.....	156

INDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Tipos de hornos de crisol.....	12
Figura 2.2 Métodos de calentamiento con combustibles por aplicación de la llama.....	15
Figura 2.3 Crisoles de grafito Salamander.....	17
Figura 2.4 Modelos de crisoles	19
Figura 2.5 Conducción de calor a través de la pared de espesor y área.....	35
Figura 2.6 La velocidad de conducción del calor en el sólido es directamente proporcional a su conductividad.....	36
Figura 2.7 Perdida de calor en las paredes planas	37
Figura 2.8 Diagrama flujo de calor	37
Figura 2.9 Conducción de calor pared plana (tapa del horno).....	39
Figura 2.10 Tubo cilíndrico, con temperaturas de las superficies interior y exterior especificadas	40
Figura 2.11 Flujo de calor a través de secciones cilíndricas múltiples y analogía eléctrica....	41
Figura 2.12 Flujo de calor a través de secciones cilíndricas múltiples	42
Figura 2.13 Transferencia de calor por convección.....	43
Figura 2.14 Rango de la conductividad térmica de diversos materiales.....	49
Figura 2.15 Cuadro variación de la conductividad térmica en diversos materiales.....	50
Figura 2.16 Combustión perfecta estequiométrica	53
Figura 2.17 Combustión completa con exceso de aire	54
Figura 2.18 Combustión incompleta con defecto de aire	54
Figura 2.19 Combustión imperfecta	56
Figura 2.20 Formación de llama y gasodinámica de la combustión.....	57
Figura 2.21 Chorro en el espacio libre.....	58
Figura 2.22 Angulo de quemados de forma de chorro.....	59
Figura 2.23 Formación de chorro con recirculación de gases	60
Figura 2.24 Perfil del flujo por efecto de la radicalidad proporcionada	60
Figura 2.25 Perfil del flujo por efecto de la radicalidad proporcionada	61
Figura 2.26 Diagrama de transmisión de calor en el interior de la cámara de un horno	64
Figura 2.27 Flujo de calor en los hornos.....	67
Figura 2.28 Gradiente de temperatura en un horno	69
Figura 2.29 Representación de un esquema de dos paredes cilíndricas	70
Figura 3.1Etapas del proceso de diseño y construcción del horno basculante	77

Figura 4.1 Turbulencia generada por efecto de los canales verticales en las paredes vista de planta	80
Figura 4.2 Diseño del horno.....	81
Figura 4.3 Estructura interna del horno	81
Figura 4.4 Medidas del crisol.....	83
Figura 4.5 Esquema de bastidor de (estructura metálica)	87
Figura 4.6 Esquema del quemador usado en el horno de crisol con GLP	88
Figura 4.7 Diseño del Quemador para GLP.....	89
Figura 4.8 Esquema del quemador usado en el horno de crisol con GLP	90
Figura 4.9 Balón de GLP existente el mercado para el horno de crisol.....	91
Figura 4.10 Diseño y dimensionamiento del horno.....	92
Figura 4.11 Dimensionamiento de la cámara y crisol.....	94
Figura 4.12 Dimensionamiento de la cámara y crisol.....	94
Figura 4.13 Volumen de canales verticales	95
Figura 4.14 Volumen de los canales de turbulencia	96
Figura 4.15 Volumen de torreta	96
Figura 4.16 Balance de energía del horno	102
Figura 4.17 Perfil de temperaturas.....	106
Figura 4.18 Analogías eléctricas, son equivalentes a la resistencia del horno.	108
Figura 4.19 Rolado y soldado de la chapa metálica del cuerpo del horno.....	117
Figura 4.20 Trazado de corte de ladrillos refractarios base	118
Figura 4.21 Trazado de corte de ladrillos refractarios	119
Figura 4.22 Corte De Ladrillos	119
Figura 4.23 Ladrillos en cuña para la cámara de combustión.....	120
Figura 4.24 Disposición de ladrillos para la cámara de combustión	120
Figura 4.25 Canales de turbulencia y agujero de entrada de quemador.	121
Figura 4.26 Vaciado de la base de la cámara.....	123
Figura 4.27 Orientación tangencial del quemador en la cámara de combustión	123
Figura 4.28 Ubicación de la tobera del quemador y crisol	124
Figura 4.29 Posicionamiento de los ladrillos refractarios de cuña para su conformado.....	125
Figura 4.30 Preparación del cemento refractario.....	125
Figura 4.31 Conformado de los ladrillos refractarios	125
Figura 4.32 Vaciado final de la cámara de combustión.....	126

Figura 4.33	Curado de la cámara de combustión.....	126
Figura 4.34	Corte de ladrillos de la tapa	127
Figura 4.35	Trazado de los ladrillos.	128
Figura 4.36	Corte del ladrillo para la tapa.	128
Figura 4.37	Forma del ladrillo para la tapa de retorno	128
Figura 4.38	Tallado de canales de retorno.	129
Figura 4.39	Prueba de canales de retorno.	130
Figura 4.40	Fijado de ladrillos de la tapa.....	130
Figura 4.41	Trazo de soporte de base del crisol.....	130
Figura 4.42	Trazo de soporte de base del horno de crisol.	132
Figura 4.43	Construcción del bastidor del horno.....	132
Figura 4.44	Presentación de bastidor.	133
Figura 4.45	Reforzado de uniones con soldadura.....	133
Figura 4.46	Ubicación del eje y pernos de la chumacera	134
Figura 4.47	Soldadura de ejes de sujeción y balanceo.....	134
Figura 4.48	Sistema de volteo basculamiento del horno	135
Figura 4.49	Sistema de volteo para la colada.	135
Figura 4.50	Sistema de volteo para la colada	136
Figura 4.51	Quemador del horno armado	136
Figura 4.52	Prueba del quemador	137
Figura 4.53	Soldadura y construcción de la turbina.	137
Figura 4.54	Soldadura y construcción de la turbina	138
Figura 4.55	Ensamblaje de turbina y quemador	139
Figura 4.56	Pruebas de encendido del horno	139
Figura 4.57	Turbulencia generada en los canales de la cámara del horno.....	140

INDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Combustibles usados en hornos de crisol	14
Tabla 2.2 Variación del calor con la temperatura	16
Tabla 2.3 Formato estándar de ladrillos.....	28
Tabla 2.4 Características y propiedades de los materiales refractarios	29
Tabla 2.5 Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente.....	48
Tabla 2.6 Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente.....	51
Tabla 3.1 Operacionalización de variables	¡Error! Marcador no definido.
Tabla 4.1 Formatos y dimensiones de los crisoles.....	84
Tabla 4.2 Características del ladrillo refractario empleado en la construcción del horno.....	85
Tabla 4.3 Características de materiales metálicos seleccionados.	86
Tabla 4.4 Propiedades mecánicas del acero A-36	86
Tabla 4.5 Propiedades del propano y butano	90
Tabla 4.6 Dimensionamiento del horno.....	91
Tabla 4.7 Balance de materia.....	101
Tabla 4.8 Resumen del balance de energía en la fundición de aluminio.	117
Tabla 5.1 Datos de precalentamiento.....	141
Tabla 5.2 Datos de funcionamiento	142
Tabla 5.3 Datos de prueba de fusión.....	144
Tabla 5.4 Balance materia.....	145
Tabla 5.5 Balance de energía	145
Tabla 5.6 Comparación de datos de pruebas	146

INDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Matriz de consistencia	149
Anexo 2 Castables y refractarios	150
Anexo 3 Ladrillos refractarios	151
Anexo 4 Diseño del horno	152
Anexo 5 Vista superior y lateral del horno	153
Anexo 6 Tapa del horno con canales de retorno	154
Anexo 7 Ladrillo refractario con canal de turbulencia	155

SIMBOLOGIA

Cp:	Calor específico
ϵ :	Emisividad
GLP:	Gas licuado de petróleo.
Gr:	Número de Grashof
h:	Coefficiente de transferencia de calor por convección
K:	Conductividad térmica
kJ:	Kilo Joules
N:	Newton
Nu:	Número de Nusselt
Pr:	Número de Prandtl
Psi:	Libras por pulgada cuadrada
Q:	Calor
Re:	Numero de Reynolds
W:	Watts
ΔT :	Variación de temperatura
AISC:	American Institute of Steel Construcction (Instituto Americano de Construcción en Acero).
AISI:	American Iron and Steel Institute (Instituto Americano del hierro y el Acero).
ASTM:	American Society of Testing Material (Sociedad Americana para pruebas de Materiales)
AWS:	American Welding Society (Sociedad Americana de Soldadura).

RESUMEN

La fundición es uno de los procesos más utilizados para la obtención y conformación de piezas metálicas en la industria para lo cual utiliza muchos tipos de hornos que varían desde su capacidad hasta el material a ser procesado, presentan una innumerable variedad de hornos para metales ferrosos y metales no ferrosos. En el Perú se utilizan de manera artesanal hornos que usan combustibles de alto poder calorífico como el diésel o aceite reciclado de los motores de los vehículos, sin embargo, producen altos índices de contaminación en el medio ambiente y al no contar con una adecuada tecnología la mayoría de fundidores tienen altos costos de operación, baja eficiencia y por lo tanto bajos niveles de utilidades. Al investigar la situación actual de la fundición en el país, se identificó la necesidad de mejorar el diseño y construcción de un horno para lograr una mayor eficiencia térmica con menor consumo de combustible, emisión mínima de gases contaminantes, y reducir las pérdidas de calor generadas durante la manipulación. Como solución al problema, surge la propuesta desarrollada en esta tesis.

- El tipo de investigación desarrollada es tecnológica, de nivel descriptivo y correlacional simple con enfoque cuantitativo; el método utilizado fue el hipotético deductivo.

- El diseño de la investigación es no experimental de carácter transversal correlacional lo cual permite diseñar y construir un horno para fundición de aleaciones no ferrosas como las de aluminio, magnesio, cobre, estaño, bronce y otros metales cuyo punto de fusión este por debajo de los 1300 °C. El horno consiste de una estructura exterior cilíndrica que bascula, en cuya parte interior central posee una cavidad cilíndrica de menor dimensión conocida como cámara de combustión, en donde el flujo de calor generado por el combustible GLP es $5580.489 \frac{Kcal}{h}$ que será retenido mediante canales dispuestos verticalmente en la pared de la cámara de combustión generando flujo turbulento y mayor permanencia de la llama en la misma, la tapa posee canales dispuestos a continuación de los canales laterales generando la recirculación de la llama hacia la parte superior del crisol para alcanzar mayores temperaturas y lograr la fusión de las escorias

que se forman por acción del calor y los gases. Las dimensiones del horno y sus elementos constitutivos se obtienen mediante cálculos de ingeniería obteniéndose como resultados principales, la capacidad del horno con una carga de prueba experimental de 5 kg, el diámetro externo del horno de 390 mm, el diámetro interno es de 155 mm y la altura de 333 mm.

El horno tiene una pared que consta de tres partes: una refractaria de 60 mm de espesor, otra aislante 55mm y todo esto cubierto por una plancha de acero de 3mm que sirve como estructura de sostenimiento. Este horno usa como fuente de energía el combustible (GLP) y para la mejor combustión se insufla aire mediante una turbina. Como recipiente para la fusión se emplea un crisol de grafito Salamander A8 de 8 kg de Al.

La singularidad de este horno, se fundamenta en el diseño de la cámara de combustión y los materiales empleados para su construcción cumplen con los requerimientos de operación, el horno logro una mayor eficiencia térmica de 78.61%, mediante el menor consumo de combustible, entre 1.5 kg de GLP por carga de 5 kg de aluminio en un tiempo de fusión de 21.6 min alcanzando una temperatura de colado de 750 °C.

Se concluye que el diseño y construcción del horno de crisol basculante, logró mejorar la eficiencia y efectividad en la obtención de aleaciones no ferrosas, aportando avances significativos en términos de diseño, construcción y rendimiento. Estas mejoras posibilitarán un impacto positivo tanto en la industria de fundición de metales no ferrosos como en la sostenibilidad de los procesos desarrollados en el sector.

Palabras clave: diseño y construcción del horno, horno basculante, cámara de combustión, refractarios, aleaciones no ferrosas y combustible GLP.

ABSTRACT

Foundry is one of the most used processes for obtaining and shaping metal parts in the industry, for which it uses many types of furnaces that vary from their capacity to the material to be processed, they present an innumerable variety of furnaces for ferrous metals and Nonferrous metals. In Peru, ovens that use fuels with high calorific value such as diesel or recycled oil from vehicle engines are used in an artisanal way, however, they produce high levels of pollution in the environment and by not having adequate technology, the Most smelters have high operating costs, low efficiency and therefore low profit levels. When investigating the current situation of smelting in the country, the need to improve the design and construction of a furnace was identified to achieve greater thermal efficiency with lower fuel consumption, minimum emission of polluting gases, and reduce heat losses generated during manipulation. As a solution to the problem, the proposal developed in this thesis arises.

The type of research developed is technological, descriptive and simple correlational level with a quantitative approach; the method used was the hypothetical deductive one.

The research design is non-experimental, of a cross-correlational nature, which allows designing and building a furnace for smelting non-ferrous alloys such as aluminum, magnesium, copper, tin, bronze and other metals whose melting point is below the 1300 0C. The furnace consists of an external cylindrical structure that tilts, in whose central interior part it has a smaller cylindrical cavity known as the combustion chamber, where the heat flow generated by the LPG fuel is 5580.489 K_cal/h that will be retained through channels. arranged vertically on the wall of the combustion chamber, generating turbulent flow and a longer stay of the flame in it, the lid has channels arranged after the side channels, generating the recirculation of the flame towards the upper part of the crucible to reach higher temperatures and achieve the fusion of the slags that are formed by the action of heat and gases. The

dimensions of the furnace and its constituent elements are obtained through engineering calculations, obtaining as main results the capacity of the furnace with an experimental test load of 5 kg, the external diameter of the furnace is 390 mm, the internal diameter is 155 mm and the height of 333 mm.

The oven has a wall that consists of three parts: a 60 mm thick refractory, another 55 mm insulating, and all of this covered by a 3 mm steel plate that serves as a support structure. This oven uses fuel (LPG) as an energy source and for the best combustion air is blown through a turbine. A Salamander A8 graphite crucible with 8 kg of Al is used as a vessel for melting.

The uniqueness of this furnace is based on the design of the combustion chamber and the materials used for its construction meet the operating requirements, the furnace achieved a higher thermal efficiency of 78.61%, through lower fuel consumption, between 1.5 kg of LPG per load of 5 kg of aluminum in a melting time of 21.6 min, reaching a casting temperature of 750 °C.

It is concluded that the design and construction of the tilting crucible furnace managed to improve the efficiency and effectiveness in obtaining non-ferrous alloys, providing significant advances in terms of design, construction and performance. These improvements will enable a positive impact both in the non-ferrous metal casting industry and in the sustainability of the processes developed in the sector.

Keywords: design and construction of the kiln, tilting kiln, combustion chamber, refractories, non-ferrous alloys and LPG fuel.

INTRODUCCIÓN

Esta investigación tiene como propósito desarrollar e innovar el diseño de ingeniería y la tecnología de construcción de un horno para la obtención de metales reciclados, a partir de metales secundarios no ferrosos, empleo de un nuevo diseño de la cámara de combustión juntamente que la tapa de retorno, el uso de combustible GLP y uso funcional del horno. Previamente se realizaron cálculos y pruebas experimentales que permitieron determinar que la propuesta de la investigación es óptima con respecto al trabajo de otros hornos similares.

Es posible definir que los hornos metalúrgicos, tienen amplio rango de servicio.

Se tomaron en cuenta diferentes parámetros para poder recopilar información para su clasificación y sus elementos de construcción, en donde se describe con atención los hornos de fundición de metales en sus diversos tipos.

Los materiales y refractarios son la parte fundamental de la construcción de los hornos de fundición, debido a las propiedades utilizables presentes en cada uno de ellos.

El diseño de ingeniería se basa en una nueva forma geométrica de la cámara de combustión que genera mayor turbulencia y retención de la llama en los canales verticales de la cámara durante todo el proceso, logrando que la llama circule más tiempo en las paredes del crisol, donde las llamas superiores son redireccionadas en la tapa y retornan hacia la carga al interior del crisol y de esta manera se alcance una mayor temperatura en menor tiempo

La actividad industrial de obtención de aleaciones no ferrosas, en la actualidad demanda una mayor competitividad e innovación en un mundo globalizado. En tal sentido, se entiende que la tangibilidad del diseño, construcción y operatividad del horno facilita una alternativa de mejora tecnológica en el área de fundición.

CAPÍTULO I ASPECTOS GENERALES

1.1 Planteamiento del problema

En la Región del Cusco se genera una gran cantidad de metales secundarios para su reciclaje, como chatarra de aleaciones no ferrosas, de cobre, aluminio, magnesio, etc. Representan una gran fuente de materia prima para la fundición, es así que, este sector productivo hace uso de hornos tradicionales para la fundición y fabricación de piezas y accesorios como poleas, paletas de ventilador, tochos, placas, carcasas para la mecánica industrial, artesanía, metal mecánica y minería, aunque sus procesos de fundición aún son en forma artesanal y poco tecnológicos, por lo cual se identifica el problema fundamental que requiere de procesos de fusión más eficientes y limpios para lograr costos competitivos en el mercado

En nuestra Región la fundición a pequeña escala, no ha tenido innovación ni implementación de tecnología razón por la que en ese ámbito existen básicamente tres principales sectores que aun emplean los procesos artesanales de fundición, estos campos son: el metal mecánico, la artesanía metálica y la minería artesanal.

En cuanto a lo que es la metal mecánica existen dos tipos, Metal mecánica mediana y pequeña, de la cual la principal diferencia vendrían a ser los volúmenes de producción, estas usan primordialmente hornos de fosa de diferentes tamaños de acuerdo a las necesidades de cada empresa, estos hornos son recipientes de forma cilíndrica que se disponen al interior del suelo, están revestidos generalmente de ladrillos refractarios hechos a base de alúmina, y usan como combustible petróleo o aceite quemado (de los motores), esto de acuerdo al poder calorífico que desean que tenga en relación al material a fundir, este tipo de combustible es alimentado por una tubería metálica unida a una turbina de aire, esta unión se denomina tobera y es donde se realiza la mezcla del combustible con el oxígeno antes de ingresar a la cámara de combustión, los

porcentajes de oxígeno y combustible son controlados por medio de llaves de paso y son calculados de manera empírica (Calvo, 2015).

En tanto en la artesanía metálica de la región, la mayoría emplea hornos adaptados con tecnología precaria, emplean fuelles, quemadores atmosféricos y quemadores asistidos con turbinas de aire, sobre crisoles cerámicos apenas improvisados, de otra parte, el sector joyero ha implementado hornos eléctricos de pequeña capacidad y presentan altos costos de producción por el elevado consumo de energía eléctrica en relación al tiempo del funcionamiento.

Esto demuestra que al no tener una adecuada tecnología los servicios de fundición tienen elevados costos de operación, bajos niveles de eficiencia y por lo tanto también escasos niveles de ganancias, es así que fundir en nuestra región se vuelve más un arte o una alquimia con bajos beneficios es por este motivo que se realiza esta investigación.

Por lo mencionado, el presente trabajo de investigación desarrollado tiene como objetivo proponer una innovación de diseño y construcción de un horno basculante para aleaciones no ferrosas utilizando como combustible GLP.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 *Problema general*

¿Es posible innovar el diseño de ingeniería y construcción de un horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas?

1.2.2 *Problemas específicos*

- ¿Se podrá modificar el diseño del sistema de calentamiento del horno convencional de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas?
- ¿Se puede perfeccionar la construcción del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas?

- ¿Resulta ser eficiente el desempeño del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante en relación con los hornos tradicionales empleados para el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas?

1.3 Objetivos

1.3.1 *Objetivo general.*

Innovar el diseño y construcción de un horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas.

1.3.2 *Objetivos específicos*

- Modificar el diseño del sistema de calentamiento del horno convencional de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas.
- Perfeccionar la construcción del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas.
- Evaluar la eficiencia térmica del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante comparándolo con hornos tradicionales empleados para el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas,

1.4 Hipotesis

1.4.1 *Hipótesis General*

La innovación en el diseño y construcción del horno de crisol basculante permitirá optimizar el proceso de fusión de las aleaciones de metales no ferrosos.

1.4.2 *Hipótesis específicas*

- La modificación del diseño del sistema de calentamiento del horno convencional de crisol basculante contribuirá en la eficiencia del proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas.

- El perfeccionamiento de la construcción del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante permitirá optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas
- La eficiencia térmica del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante será mayor en relación con hornos tradicionales empleados para el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas,

1.5 Variables

1.5.1 *Variable Independiente*

Diseño y construcción del horno basculante

Dimensiones

- Forma
- Tamaño
- Material
- Sistema de calentamiento.
- Control de temperatura

1.5.2 *Variable dependiente*

Producción de aleaciones no ferrosas

Dimensiones

- Cantidad
- Composición química

1.6 Justificación

Este trabajo de investigación se hace ante la evidente necesidad de mejorar el proceso de fundición para la obtención de aleaciones no ferrosas a partir de chatarra metálica que en nuestro

medio existe, dicho material debe ser aprovechada con la finalidad de generar una visión prospectiva para mejorar dichas fundiciones dándole un valor agregado. La investigación será de suma importancia por los siguientes aspectos:

1.6.1 *Desde el punto de vista ambiental.*

Al utilizar el combustible GLP se realizará una combustión completa en donde se minimizará los niveles de contaminación y se acataran las normas ambientales con relación a la protección de nuestro medio ambiente.

1.6.2 *Desde el punto de vista tecnológico.*

Este trabajo de investigación nos muestra que el horno, es eficiente térmicamente por el novedoso diseño, además, porque se utilizaron materiales óptimos en su construcción, ladrillos refractarios, materiales aislantes que reducen la pérdida de calor, es basculante por tener menos tiempo de manipulación del crisol

La propuesta de esta investigación aplicada es el diseño de la cámara de combustión y la tapa de retorno, su estructura funcional y uso del combustible GLP de forma agrupada que logran mayor eficiencia con un menor consumo de combustible.

1.6.3 *Desde el punto de vista económico.*

Al reducir los tiempos de fusión automáticamente se minimizarán los costos, de esta manera se hace más viable la operación del proceso, lo que se puede materializarse en un emprendimiento.

1.6.4 *Desde el punto de vista social.*

Este trabajo de investigación lo que quiere es contribuir con los conocimientos teórico-práctico en el sector de la fundición, tanto como para profesionales y personal técnico en beneficio de la sociedad.

1.7 Antecedentes

Anteriormente se realizaron trabajos investigación en diseño y construcción como:

1.7.1 *Nivel internacional:*

Edison Javier Vega Cardenal (2021) Como tema de tesis **Diseño y construcción de horno basculante a gas, para fundición de metales blandos**, desarrollado en Santo Tomas – Colombia, el cual trata la problemática que representa la falta de hornos de fundición en la región de Santo Tomas, lo cual dificulta el aprovechamiento adecuado de la chatarra de aluminio, por lo mismo que se propone el diseño y fabricación de un horno de crisol basculante, con capacidad de hasta 5 kg, para fundir metales blandos, como objetivos específicos se plantean la definición de materiales y construcción del dispositivo, evaluar el funcionamiento del equipo, al concluir este trabajo se logró diseñar y construir un horno basculante para la fundición de metales blandos, el mismo que considera el GLP como combustible, en la selección de materiales y elementos del horno, se tomó en cuenta la resistencia que deben de tener y las condiciones a las cuales estarán expuestos, finalmente el puesta en marcha y resultados obtenidos comprueban el buen funcionamiento del horno

Aliaga Suñagua Luis Adolfo (2018) como tema de tesis **Diseño de un horno de fundición para la empresa SERTEC**. Universidad Mayor de San Andrés, Facultad de Tecnología. Presentado por. La Paz – Bolivia, Resumen: En esta investigación se realizó el diseño de un horno de fundición para cobre que posee una capacidad de 50 kg. El horno es de tipo basculante que se

adecuó el volumen y la capacidad de producción requerida por la empresa SERTEC, en las pruebas de funcionamiento el horno demora 35 minutos hasta alcanzar los 900 °C y el proceso de fusión tarda 45 minutos. Se concluyó que es viable el diseño del horno de fundición para fundir cobre reciclado es decir presta las condiciones establecidas en los cálculos.

Sebastián Andrés Trujillo roldan (2015) el tema de tesis es **Diseño y construcción de un horno de crisol para fundición utilizando gas natural**, de la Universidad de San Francisco de Quito – Ecuador. La investigación tuvo como objetivo diseñar y construir un prototipo de horno para fundir metales no ferrosos, usando un hogar y crisol que se calientan con un sistema de combustible con el gas natural con impulso del aire. Este horno está provisto de un mecanismo de cuidado para la fundición con una tapa removible. Esta investigación generó conclusiones del funcionamiento del horno con el flujo de aire para administrar oxígeno, para subir y bajar temperaturas controlando el flujo del aire.

Suntaxi Loachamin y Torres Riascos (2014) tema de tesis **Diseño y construcción de un horno crisol para fundición de aluminio** con una capacidad de 15kg/h a una temperatura de 800 °C utilizando GLP, de la Universidad Politécnica Salesiana Sede – Quito, logrando fundir la capacidad propuesta, dimensionamiento del horno con la propuesta del proyecto, utilizo materiales de su medio cumpliendo sus parámetros y variables y el funcionamiento del horno se evidencio que cumple con los siguientes requerimientos, fácil operatividad, alto rendimiento, eficiente y de bajo costo con respecto a hornos que se encuentren en el mercado.

Mestanza Barragán y Lara Villegas (2012) como tema de tesis **Diseño y construcción de un horno de combustión industrial para fundir aluminio**. De la Escuela Superior Politécnica De Chimborazo De Riobamba – Ecuador. Se ha diseñado un horno de fundición de combustible industrial para la fundición de aluminio con una capacidad de 16Kg., por la viabilidad para efectuar

su práctica a nivel laboratorio con criterios de diámetro de crisol de 22 cm. Se diseñó y construyó un horno de fundición de combustión industrial para fundir aluminio de 16 kg de capacidad, por la facilidad para realizar una práctica a nivel de laboratorio, así mismo se utilizaron diámetros de cámara para combustión a 7.5 cm. De diámetro para el requerimiento de material aislante a la altura del horno incluyendo base y tapa (61.7cm) además de la cantidad de calor requerida para fundir la carga (10541 Kcal/h) y la cantidad de calor que se pierde por las paredes (2195 kcal/h)

1.7.2 Nivel nacional:

Marcberto Antay Layme y, Bryan Pfuero Romero (2022) con el tema de tesis **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 donde se determinó una eficiencia térmica del horno de crisol de 80,3 % mediante cálculos del balance de energía, con el uso de combustible GLP

Wilber Aquima Ppacco y Danitza Daniela Carlos Yucra (2022) con el tema de tesis **Diseño y construcción de un horno de crisol basculante a gas natural para fusión de aluminio**, de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, Universidad San Antonio Abad del Cusco, donde 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

Daniel Elemiro Cabrera García y José Miguel Morales Orillo (2019) con el tema de tesis **Diseño y construcción de un horno crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre de la Universidad Privada del Norte Cajamarca – Perú**, el presente trabajo de investigación, se puede concluir que el diseño y la construcción del horno de crisol estacionario; logro elaborar una herramienta funcional con la característica de ser fácil de usar funcional y económico.

Danny Richard Borda y otros (2006) realizo el tema de tesis **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, que concluye que el horno GLP es eficiente y su grado de contaminación es muy bajo.

CAPITULO II. BASES TEÓRICAS

2.1 Hornos

Viene a ser un equipo que contiene calor que transmite de manera directa o indirecta a un objeto solido o fluido, con el fin de una transformación química o física (Castillo P. , 2015).

2.1.1 Partes del horno

Las partes de un horno:

- Quemador
- Tapa o compuerta
- Cámara principal (paredes y solera)
- Sistemas de basculamiento
- Sistema de suministro y control de combustible
- Elemento de evacuación de gases (hornos con combustión)
- Recubrimiento externo
- Conexión eléctrica

La energía en forma de calor que se necesita para el calentamiento de un horno puede proceder de gases calientes producto de la combustión de combustibles sólidos, líquidos o gaseosos, que pueden calentar piezas con el contacto directo mediante tubos radiantes o cambios en general (Castillo P. , 2015).

2.2 Tipos de hornos metalurgicos

Los hornos que son utilizados para la fundición de metales varían de acuerdo a su capacidad y tamaño. Estos detalles son diferentes desde tamaños pequeños que logran contener unos kilos, y otros que podrían contener hasta 200 toneladas de capacidad.

El tipo de horno que se utilizan para la fundición varia debido a diferentes factores.

- La necesidad de fundir el metal tan rápidamente como sea posible, elevando su temperatura a la temperatura de vaciado requerido.
- La necesidad de mantener tanto la pureza de la carga como precisión de su composición.
- La producción requerida del horno.
- El costo de operación del horno.
- Interacción entre la carga el combustible y los productos de la combustión (Marek, 2006)

2.2.1 *Hornos de crisol*

El horno de crisol es utilizado para fundir metales no ferrosos, donde la llama no entra en contacto directo con los gases de combustión y es por eso que algunas veces se denominan hornos de calentamiento indirecto. Estos hornos llevan un crisol en el interior de la cámara de combustión, revestido de ladrillos refractarios y aislamiento térmico; Hay tres tipos de hornos de crisol: (ver la figura. 2.1), (Castillo P. , 2015).

2.2.2 *Horno de crisol móvil*

El crisol es colocado en el horno para fundir la carga metálica, cuando el metal es fundido se retira el crisol del horno para realizar la colada. Este tipo de hornos se pueden fabricar tanto debajo del nivel del piso como encima. En ambas situaciones el horno es fijo. (Castillo P. , 2015).

2.2.3 *Horno de crisol estacionario*

Este horno es también conocido como bale-out, en donde el crisol permanece fijo y el metal fundido se extrae con cucharas para los moldes. Su uso es para fundiciones en donde se necesita pocas cantidades e intervalos frecuentes, la capacidad de este horno fluctúan entre los 50 a 500 kg (Castillo P. , 2015).

2.2.4 Horno de crisol basculante

Según (Groover, 1997) Son hornos móviles apoyados en un dispositivo entero que se inclina para dejar vaciar la carga, pues estos hornos son utilizados para fundir metales no ferrosos con aleaciones de bronce y latón, pues se utiliza solo cuando es necesaria la producción grande con una aleación determinada.

Después de esto el metal se traspara a los moldes con una herramienta parecida a la cuchara, en algunos casos especiales se vacía de manera directa, el problema de este tipo horno es el punto de descarga que conduce al movimiento basculante.

Figura 2.1

Tipos de hornos de crisol



Nota: Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas. Front Cover · Mikell P. Groover. Pearson Educación, 1997 pag. 247.

2.3 Formas de calentamiento en los hornos de crisol

En este tipo de horno el calentamiento se da en relación a la energía empleada, en cuanto a la energía eléctrica los que la utilizan son los hornos de inducción y arco eléctrico o de combustibles. En tanto los hornos de crisol pueden utilizar diferentes tipos de combustible (Tabla 2.1). La energía por los combustibles, tienen sus ventajas y desventajas las mismas que deben ser aprovechadas o evitadas de acuerdo con las condiciones de producción. Los combustibles más

usados en la industria son el petróleo y gas. Por su facilidad de transporte y manipulación en su estado líquido; su forma de alcanzar una gasificación óptima es proyectando finamente (pulverizar, atomizar) hacia el interior de la cámara de combustión o reactor. Esto se logra en el quemador.

Los quemadores para petróleo deben realizar los siguientes objetivos:

- Atomizar el petróleo en partículas de diámetros entre 30 a 150 micrones
- Mezclar el petróleo pulverizado procurando la mayor combinación con el aire.
- Conservar la proporción entre el aire y el petróleo constantes.

El gas combustible hace más fácil las condiciones de servicio, después de la energía eléctrica. La energía eléctrica tiene como obstáculo el peligro de explosión y el costo relativamente elevado.

2.3.1 *Métodos de calentamiento en hornos*

En cuanto a los métodos de calentamiento con combustibles tenemos los siguiente:

(ver en la Figura 2.2)

Directo

La llama y gases entran en contacto directo con la carga

Indirecto

Los gases entran en contacto con la carga, más no la llama.

Muflas

En este tipo de calentamiento primero se calienta una recámara que lleva dentro la carga, razón por la que los gases nunca llegan a tocar la carga.

Es especial para aquellas cargas que reaccionan químicamente o se contaminan con los gases de combustión.

Tabla 2.1*Combustibles usados en hornos de crisol*

Combustible	Tipo	Poder Calorífico (Kcal/Kg)
Sólido	Leña	3800
	Carbón mineral	4000 a 6000
	Coque de fundición	6200 7500
	Coque de petróleo	8000
	Carbón vegetal	6500 7000
Líquido	Gasolina	10200
	Petróleo diésel	11000 kcal litro
	Alcohol etílico	11600
	Querosene	7300
	Petróleo-Fuel-Oil	9820
Gaseoso	Gas licuado de petróleo	10900
	Gas de coque	4500
	Gas natural	10000
	Metano	8500

Nota: Tesis diseño cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes “Frey Jonathan Pérez pino, Armando Enrique Soto Payares”

Pag 23

Tubos Radiantes

Este tipo de sistema hace alto uso de combustible para poder obtener el mismo calentamiento, La llama es encausada por un tubo el cual alcanza una elevada temperatura, después el calentamiento se lleva a cabo así por radiación del tubo a la carga.

Recirculación

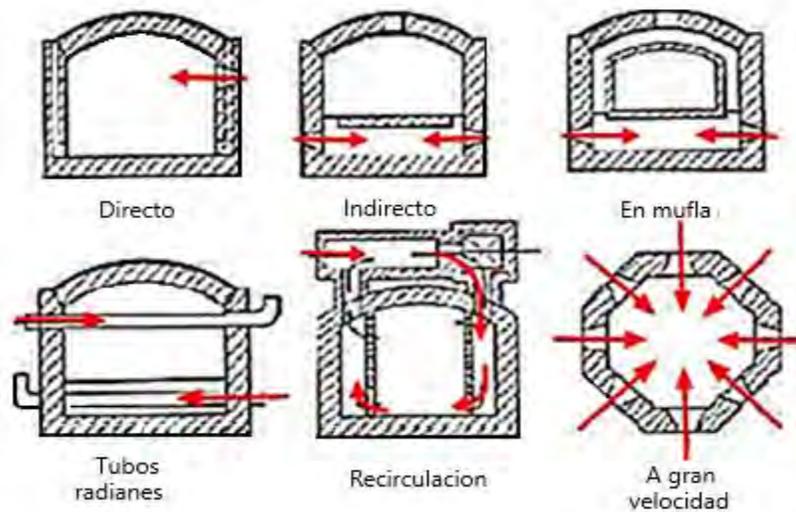
Aquí la combustión se realiza en una cámara independiente del horno, para luego mediante un ventilador se ingresan los gases al horno y se hace pasar por la carga reiteradas veces hasta que estos pierdan la mayor cantidad de energía y posteriormente ser evacuados.

A gran velocidad

Este se caracteriza por tener una gran cantidad de quemadores los que rodean la carga, dirigiendo llamas de forma directa sobre ella con la finalidad de poder alcanzar un alto gradiente de temperatura entre la carga y sus alrededores.

Figura 2.2

Métodos de calentamiento con combustibles por aplicación de la llama



Nota: Tesis diseño cálculo y construcción de un horno de fundición de aluminio tipo basculante y sus moldes “Frey Jonathan Pérez Pino, Armando Enrique Soto Payares” pág. 16

2.3.2 Determinación de la temperatura por el color

Un método muy utilizado y sencillo para la determinación de la temperatura de un metal es mediante la técnica de la observación del color del cuerpo en estado caliente, donde se verá una correlación entre la temperatura del metal y los colores que este emite, esta propiedad nos posibilita estimaciones de temperatura aproximadas a las reales excepto cuando se hace uso de un observador experimentado. La dificultad más importante sería la apreciación del color varié con diferentes materiales.

Tabla 2.2*Variación del color con la temperatura*

Color del metal	° C	° F	Color de metal	°C	°F
Amarillo débil	215	420	Azul	293	560
Amarillo muy pálido	221	430	Azul oscuro	299	570
Amarillo claro	226	440	Azul muy oscuro	315	600
Amarillo pajizo pálido	232	450	Azul verde	332	630
Amarillo pajizo	237	460	Negro rojo	537	1000
Amarillo pajizo oscuro	243	470	Rojo sangre	649	1200
Amarillo oscuro	249	480	Rojo cereza claro	746	1375
Amarillo pardo	254	490	Rojo cereza medio claro	774	1425
Pardo amarillo	260	500	Rojo cereza	815	1500
Pardo con manchas rojas	265	510	Rojo brillante	843	1550
Pardo púrpura	271	520	Salmón	899	1650
Púrpura claro	276	530	Naranja	940	1725
Púrpura	282	540	Limón	996	1825
Púrpura oscura	288	550			

Nota: <http://www.soldadurasmagna.cl/productos/magna/comosaberlatemper.htm>

Los instrumentos que se utilizan para tener registro continuo de la temperatura son los siguientes:

- a) Los sistemas de tipo mecánico que funcionan por efecto de la expansión de un metal, un líquido, un gas o vapor,
- b) Los sistemas eléctricos que funcionan por medio de la resistencia eléctrica medida, un termopar, la radiación o pirómetros ópticos.

2.4 Crisol

El crisol es un recipiente usado para depositar los metales a ser fundidos en los hornos. El material del crisol debe soportar altas temperaturas de fusión, mucho más alta que la del metal a fundir, resistente al ataque químico del metal, combustibles y gases de escape, al mismo tiempo debe tener una excelente resistencia a cambios bruscos de temperatura sin sufrir agrietamientos ni resquebrajarse (Castillo P. , 2015).

2.4.1 Tipos de crisol

Los tipos de crisol varían desde el modo que se realice su construcción hasta el material que se use en su construcción, y según la aplicación al que sean destinados:

Crisoles de grafito

Se fabrican por moldeo y cocción a elevadas temperaturas, principalmente es de una pasta compuesta de grafito, arcilla y alquitrán se le conoce como crisol de grafito Salamander que son los más usados para la fundición de metales de aluminio, cobre y sus aleaciones. Generalmente están numerados acorde a la cantidad de aluminio que pueda contener y se multiplica por tres y se obtiene la cantidad de bronce que puede contener.

Figura 2.3

Crisoles de grafito Salamander



Nota: <http://www.morganmms.com/tipos-de-crisoles-.html>

Crisoles de hierro fundido

La fundición con alto contenido de carbono ofrece una gran resistencia que atacan a muchos metales, por eso se utilizan en algunos casos crisoles de hierro fundido (Castillo P. , 2015).

Crisoles de Hess

Se caracterizan por tener una gran resistencia a elevadas temperaturas lo que las hace apropiados para una amplia variedad de operaciones químicas realizadas a elevadas temperaturas. Por otro lado, a causa de su porosidad y de su superficie áspera no son utilizables para algunos trabajos de fusión, como por ejemplo la de metales nobles.

Crisoles de Chamotte

Están constituidos por arcillas con alto contenido de sílice y alúmina, combinado con polvo de arcilla refractaria ya cocida, con arena cuarzosa y otros materiales semejantes

Crisoles de plombagina:

Se fabrican con una pasta que contiene cuatro partes de plombagina pulverizada y una parte de arcilla refractaria.

Crisoles brascados:

Los crisoles brascados son los que en sus paredes tienen carbón, son reductores de óxidos metálicos cuando se someten a la acción de la temperatura elevada. Son crisoles de arcilla refractaria cubiertos en el interior con carbón llamado brasca. Estos se emplean operaciones en las cuales hay que calentar una sustancia inhibiéndola de la acción oxidante del aire; la brasca enrojecida absorbe el oxígeno del aire, que penetra en el crisol a pesar de la tapa.

Crisoles de cristal de roca fundido

Estos podrían sustituir en muchos asuntos a los de platino. Son más económicos y resisten a elevadas temperaturas y a los cambios bruscos de calor.

Crisoles de Rose

Son crisoles de porcelana, provistos de una tapadera taladrada y de un tubo, todo de porcelana. Por el tubo se hace pasar una corriente de hidrógeno, con el cual se consigue calentar el contenido del crisol completamente libre de los efectos oxidantes del oxígeno del aire en un medio reductor

2.4.2 Capacidad del crisol

El tamaño del crisol está determinado por las condiciones del diseño, que son:

- a) Capacidad a fundir.
- b) Resistencia del crisol a altas temperaturas (superiores a 1000 °C).
- c) Económico.

Figura 2.4

Modelos de crisoles



Nota: <http://www.morganmms.com/tipos-de-crisoles-.html>

2.4.3 *Posición del crisol en el horno*

La posición del crisol en el horno es de mucha importancia. Su base puede estar al nivel o ligeramente arriba de la línea del centro del quemador. Esto se logra colocando el crisol sobre el bloque del pedestal a una altura apropiada, el crisol debe colocarse concéntrico a las paredes internas del horno y dejar espacio uniforme de combustión a su alrededor (Castillo P. , 2015).

2.4.4 *Arranque del crisol o encendido del horno*

Para los crisoles ligados con arcilla la temperatura del horno debe subir lentamente en especial para tamaños mayores de crisol; esto asegura un buen recocido y evita agrietamiento en caso de contener algo de humedad; los crisoles ligados con carbón pueden ponerse en funcionamiento más rápidamente, y también favorece su revestimiento protector que es apto para temperaturas altas para cargar (Castillo P. , 2015).

2.5 Materiales refractarios

Los materiales refractarios se utilizan para construir las paredes, soleras y bóvedas de los hornos, los materiales refractarios resisten altas temperaturas, el choque térmico y tienen un bajo coeficiente de conductividad térmica. Para la construcción de los hornos para procesos metalúrgicos se requiere materiales refractarios que soporten las temperaturas elevadas, acciones químicas severas, y otras condiciones características de los procesos. En algunas aplicaciones, el requerimiento principal puede ser infusibilidad a temperaturas extremas. En otras, la resistencia al ataque químico por una determinada clase de escoria puede ser el factor más importante.

Los refractarios sus componentes son relativamente escasos, como los compuestos químicos que poseen un elevado punto de fusión, se encuentran en la corteza terrestre en la suficiente abundancia para su utilización como refractarios, se obtienen por tratamiento químico y

entre ellos destacan la obtención de alúmina a partir de bauxita. Su utilización va de acuerdo a la clasificación de los refractarios como ladrillos, morteros, cemento, hormigones y recubrimientos. Estos refractarios emplean los para la industria del hierro y del acero, en las industrias de metales no ferrosos y en diversas industrias (Castillo P. , 2015).

2.5.1 *Propiedades de los refractarios*

Cada material refractario se caracteriza por sus propiedades físicas y químicas, entre ellos tenemos los siguiente:

Porosidad

La porosidad es la relación entre el volumen de los poros y el volumen total del material y se expresa, generalmente, en tanto por ciento. Se distinguen tres clases de porosidad: real (general), aparente (abierta) y oculta. Se llama porosidad real a la relación del volumen de todos los poros (abiertos y ocultos) al volumen total del material. La porosidad aparente es la relación entre el volumen ocupado en la atmosfera, y el volumen total de la muestra. El valor de la porosidad oculta corresponde a la relación entre el volumen de los poros que no se comunican entre sí, ni con la atmosfera y el volumen total de la muestra. La porosidad de los refractarios oscila entre los límites amplios de 1 a 80 %.

Permeabilidad respecto a los gases

Esta propiedad se manifiesta por el coeficiente expresado en litros de aire que pasa a través del material refractario de área de 1m^2 y espesor de 1m durante una hora, con una diferencia de presiones 1.359 kg/cm^2 . Esta permeabilidad depende de la temperatura, de la magnitud y características de los poros, del grado de homogeneidad y estructura del

material. El aumento de la temperatura, la permeabilidad de los refractarios respecto a los gases disminuye, porque aumenta la viscosidad del gas.

Resistencia al fuego

Esta propiedad indica la capacidad del material a resistir el fuego directo, sin derretirse, sin quebrarse, soportando temperaturas muy altas. La apreciación de la resistencia se hace según su clasificación de los diferentes materiales refractarios cuyo comportamiento se conoce.

Estabilidad térmica

Es la capacidad del material de resistir altas temperaturas en forma continua y repetitiva, sin resquebrajarse. Esta propiedad tiene especial valor en los hornos que trabajan periódicamente. Los refractarios de estabilidad térmica baja se desgastan y se destruyen rápidamente en los hornos de este tipo de trabajo.

Solidez

Se trata de la solidez constructiva o la capacidad del objeto de soportar las cargas mecánicas sin modificarse, en otras palabras, tienen que soportar las condiciones de trabajo. Generalmente, estas cargas no son grandes: no mayores de 2–3 kg/cm². Además, los refractarios generalmente trabajan a compresión y a veces a flexión o tracción. La solidez mecánica de los refractarios en su temperatura interior es mucho mayor que las cargas originadas en la mampostería del horno. Sin embargo, conviene conocer esa propiedad de los refractarios para adoptar las mejores condiciones para su transporte, carga, descarga, y su posterior tratamiento (corte, perforación, limado, etc.). Como índice de esta propiedad se toma el límite de solidez a la compresión; para la mayoría de los refractarios es de 200-

400 kg/cm². La solidez mecánica del refractario depende no solo de la naturaleza del material de fabricación, sino también de su estructura (densidad, estructura granular, etc.).

Resistencia a escorias

La Resistencia a las escorias es una propiedad de los refractarios consiste en resistir la acción de escorias recalentadas hasta el estado de líquido. Esto depende de la composición mineralógica y de la estructura (porosidad, agrietamiento, etc.) del refractario. Cuando las escorias son acidas, los refractarios deben ser también acidas, cuando son alcalinas también deben de ser los refractarios. Se debe a que los óxidos y las bases forman siempre combinaciones fácilmente fusibles.

2.5.2 *Clasificación de refractarios*

Los refractarios tuvieron lugar a muchos cambios en la industria por la forma y la utilización en los diversos procesos de obtención del metal. Para clasificar los materiales refractarios está relacionado estrechamente con la clasificación de las escorias en términos de basicidad y acidez.

a) Según su naturaleza química:

- **Ácidos** (SiO₂; Al₂O₃)

Los refractarios ácidos resisten altas temperatura, pero reacciona con otros elementos básicos. Los refractarios ácidos comunes son la arcilla de sílice, de alúmina y refractarios de arcilla, cuando a la sílice se le añade alúmina en pocas cantidades donde su punto de fusión es muy bajo y no es aplicado para aplicaciones refractarias, cuando se le agrega mayores cantidades de alúmina donde tienen alta temperatura de fusión.

- **Básicos** (CaO o MgO)

Los refractarios básicos resisten altas temperaturas, pero reaccionan con elementos ácidos. La mayoría de estos refractarios utiliza la magnesia o periclasa donde tienen un punto de fusión alto, buena refractariedad y buena resistencia.

- **Neutros** (Al_2O_3 ; MgO; Cr_2O_3 ; Fe_2O_3 ; SiO_2)

Resistentes a altas temperaturas y no reaccionan. Pueden ser utilizados para separar refractarios ácidos de los básicos, impidiendo que uno ataque al otro.

- **Especiales**

El carbono, el grafito, es utilizado para múltiples aplicaciones en productos refractarias, particularmente cuando no hay oxígeno fácilmente disponible. Estos materiales refractarios incluyen el circonio (ZrO_2), el circón ($\text{ZrO}_2\cdot\text{SiO}_2$) y una diversidad de nitruros, carburos y boruros.

b) Según su porosidad:

- **Refractarios densos**

Porosidad menor al 45%, su función principal es la de resistir las altas temperaturas y los ambientes agresivos, son resistentes al ataque químico, a la abrasión y soportan esfuerzos mecánicos importantes. Su utilización en los hornos es en la zona que estará en contacto con el medio agresivo, (escoria, metal y vapores). En los ladrillos presenta aproximadamente de 20 a 25% de la porosidad aparente, con la finalidad de lograr un mejor aislamiento térmico.

- **Refractarios aislantes**

Porosidad superior al 45%, sirven como barrera térmica (minimizan las pérdidas de calor en el horno), no son resistentes al ataque químico, a la abrasión y tienen malas

propiedades mecánicas, se colocan como una primera capa antes de los refractarios densos.

2.5.3 Tipos materiales refractarios

La expresión refractario se refiere a la propiedad de algunos materiales a resistir elevadas temperaturas sin sufrir mayor deterioro. Éstos, materiales se emplean en la fabricación de crisoles y recubrimientos de hornos e incineradoras. No existe una frontera definida entre los materiales refractarios y los que no lo son, pero una propiedad bastante requerida es que pueda soportar temperaturas de más de 1100 °C sin ablandarse.

Los materiales refractarios deben permanecer resistentes a altas temperaturas, y resistir los choques térmicos, ser químicamente inerte, presentar una baja conductividad térmica y un bajo coeficiente de dilatación. Entre los principales podemos mencionar los óxidos de aluminio (alúmina), de silicio (sílice) y magnesio (óxido de magnesio) y otro óxido que se encuentran generalmente en materiales refractarios es el óxido de calcio (cal). Las arcillas refractarias también se utilizan ampliamente en la fabricación de materiales refractarios, como pueden ser la chamota. El dióxido de circonio (circonita) se utiliza cuando hay que soportar temperaturas extremadamente elevadas. El carburo de silicio y el carbono son materiales refractarios que presentan gran resistencia a altas temperaturas, pero combustión en presencia de oxígeno si desaparece su protección de dióxido de silicio. Compuestos binarios, tales como el carburo de wolframio o el nitruro de boro pueden ser muy refractarios el carburo de wolframio o el nitruro de boro pueden ser muy refractarios. El carburo hafnio es el compuesto binario más refractario conocido, con punto de fusión de 3890 °C. El compuesto ternario carburo tántalo hafnio tiene el punto de fusión alto de 4215 °C.

Los materiales refractarios ácidos no se pueden utilizar en presencia de una base química y viceversa dado que se produciría corrosión. El circonio, la chamota y el dióxido de silicio son

ácidos. La dolomita y la magnesita son básicas, mientras que el óxido de aluminio, la cromita, el carburo de silicio o el carbono son neutros (Castillo P. , 2015).

2.5.4 Dimensiones comerciales de los ladrillos refractarios

En la actualidad los ladrillos refractarios vienen a ser los refractarios más utilizados por su versatilidad intrínseca, al ser elementos de conformación estructural pueden tomar casi cualquier forma dependiendo del diseño y tipo de horno que se requiera para la actividad, siendo estos utilizados para la construcción de superficies expuestas a condiciones especiales de trabajo (físicas y químicas a elevadas temperaturas). En la actualidad en el mercado se cuenta con una amplia variedad de formas y tamaños, las que se usan para las diferentes partes del horno, como por ejemplo para la mampostería de paredes rectas se usan ladrillos rectos, para las bóvedas y los arcos, ladrillos en forma de cuña, en la (Tabla 2.3) podemos observar algunos de los ladrillos existentes con formas y medidas.

2.5.5 Mezclas refractarias

Las mezclas refractarias para la construcción de hornos se preparan de los mismos materiales que los ladrillos refractarios. Los morteros refractarios contribuyen básicamente para asentar los ladrillos, fijar su posición en frío y mantenerlos "ligados" convenientemente durante la operación haciendo posible que con microelementos (ladrillo), consistentemente unidos por el mortero se puedan y se puedan construir microestructuras (hornos). En cierta manera la hermeticidad, la estabilidad y la fortaleza del enladrillado dependen del mortero.

Cuando se emplea castables refractarios son concretos u hormigones refractarios de fragua hidráulica estos permiten realizar diversos revestimientos monolíticos, que la estructura y refractario consigan cumplir con las exigencias de un horno. Sin embargo, la técnica que utiliza

para la instalación varía para los castables convencionales y los de bajo cemento, aquí fundamentalmente presentamos recomendaciones más usados en nuestro medio, principalmente de los que hace mal uso del vaciado manual o mecánico.

Hormigones refractarios son mezcla de agua, cemento y de material inerte refractario; se emplean en la construcción de obras monolíticas y estructurales. Las propiedades de los hormigones se adquieren luego de un tratamiento térmico adecuado, sustituyendo con éxito a la mampostería de los ladrillos.

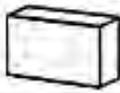
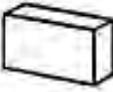
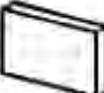
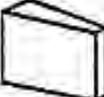
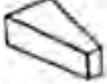
2.5.6 *Características del material refractario*

La correcta selección de material refractario (revestimiento refractario), se debe tomar en cuenta las características de los materiales refractarios, estos deberán cumplir estándares de calidad para que puedan cumplir las condiciones de trabajo, ya que estarán sometidas y deberán tener:

- Alta refractariedad
- Estabilidad volumétrica a las temperaturas de operación
- Estabilidad química (frente a gases, vapores y escorias)
- Resistencia al choque térmico
- Alta resistencia mecánica en caliente
- Alta densidad
- Baja conductividad térmica
- Alta resistencia a la abrasión
- Baja conductividad eléctrica a altas temperaturas (Institut Marianao, 2017)

Tabla 2.3

Formato estándar de ladrillos

	RECTANGULAR (STRAIGHT) 229x114x63 mm 9"x4 1/2" x2 1/4"		PEQUEÑO (SMALL) 229x89x63 mm 9"x3 1/4" x 2 1/2"
	JABON (SOAP) 229x57x63 mm 9"x2 1/4"x2 1/2"		DIVIDIDO (SPLIT) 229x114x32 mm 9"x4 1/2"x 1 1/4"
	ARCO (ARCHE) Nº1 229x114g(53-54) mm 9"x4 1/2"x(2 1/2"-2 3/8")		CUÑA (WEDGE) Nº1-X 229x114g(63-57) mm 9"x4 1/2"x(2 1/2"-2 1/4")
	LLAVE (KEY) Nº1 229g(114-102)x63 mm 9"x(4 1/2"-4")x 2 1/2"		BISEL CANTO (FEATHER EDGE) 229x114g(63-3) mm 9"x4 1/2"x(2 1/2" - 1 3/8")
	CUELLO (NECK) 229x114g(63-16) mm 9"x4 1/2"x (2 1/2"-5 3/8")		BISEL LONGITUDINAL (END SKEW) 45° (229-171)x114-63 mm (9"-6 3/4")x 4 1/2"x 2 1/2"
	BISEL LATERAL (SIDE SKEW) 45° 229x(114-57)x63 mm 9"x(4 1/2"-2 1/4")x 2 1/2"		ARRANQUE (EDGE SKEW) 229x(114-38)x63 mm 9"x(4 1/2"-1 1/2")x2 1/2"

Nota <http://www.repsa.com.pe/productos.htm>

En la tabla 2.4 se menciona las características más importantes y las propiedades que definen el comportamiento del material refractario, las que se pueden relacionar con los requerimientos de servicio para los hornos industriales.

2.5.7 Factores de desgastes en materiales refractarios

La principal causa de desgastes en los materiales refractarios es producida por los siguientes factores:

Tabla 2.4*Características y propiedades de los materiales refractarios*

A.-	CARACTERISTICAS ESTRUCTURALES
E1	Composición química.
E2	Composición mineralógica. Grado de vitrificación
E3	Tamaño de los cristales.
E4	Porosidad y densidad. Tamaño y tipo de poros
E5	Permeabilidad (Al aire, gases o vapores).
B.-	CARACTERISTICAS OPERATIVAS:
B1	MECANICAS
OM1	Resistencia a la compresión en frio
OM2	Resistencia a la flexión en frio. Módulo de deformación.
OM3	Resistencia al desgaste
OM4	Resistencia a la abrasión
B2.-	MECANICO-TERMICAS
OMT1	Refractariedad bajo carga (Ta), reblandecimiento bajo carga a temperatura creciente
OMT2	Fluencia bajo presión (Reblandecimiento bajo carga a temperatura constante, durante un largo periodo de tiempo
OMT3	Resistencia a la flexión en caliente (MOR).
B3.-	TERMICAS
OT1	Refractariedad (Resistencia pirosópica, CPE).
OT2	Dilatación térmica.
OT3	Modificación permanente de la longitud (Deformación permanente).
OT4	Conductividad térmica
OT5	Calor específico
OT6	Resistencia al choque Térmico
B4.-	QUIMICAS
OQ1	Resistencia a escorias, metales fundidos,
OQ2	Resistencia a gases y vapores
OQ3	Resistencia a los ácidos
OQ4	Resistencia a la hidratación

Nota: <http://www.uniovi.es/usr/fblanco/Refractarios.Lecion2.Propiedades.de.los.refractarios>

a) Factores químicos

- Ambiente del horno
- Combustible
- Productos de combustión
- Materiales reaccionantes
- Productos resultantes de la reacción (escorias, metales fundidos)
- Eventual influencia de la humedad ambiental o por vapor de agua

b) Factores térmicos

- Tipo de horno
- Tamaño del horno
- Calentamiento múltiple o unilateral
- Distribución de temperaturas en el horno
- Energía por unidad de tiempo
- Gradiente o temperatura en el revestimiento
- Acumulación de calor en las paredes
- Trabajo continuo o discontinuo del horno

c) Factores Mecánicos

- Horno fijo o móvil
- Características físicas de los productos reaccionantes
- Movimiento de los productos reaccionantes
- Velocidad de los gases de combustión
- Atmósfera pulverulenta
- Influencias mecánicas exteriores, por ejemplo, forma de la carga y descarga, vibraciones, deformaciones de la coraza, etc. (Institut Marianao, 2017)

2.5.8 Aislantes refractarios o materiales termoaislantes.

Cuando se realiza el aislamiento térmico se utiliza el ladrillo termoaislante, polvos de relleno, algodón de escorias, fibra de vidrio, manto cerámico y otros materiales. El ladrillo mencionado se fabrica de los mismos materiales que el ladrillo refractario y adquiere sus propiedades aislantes debido a su porosidad, para obtener dichos ladrillos se usan los métodos:

- Los agregados que se eliminan por combustión durante la fabricación se introducen aserrín o carbón vegetal triturado y finamente molido. Al ser sometido a la tostación, estos agregados se queman dejando en su lugar orificios (poros)
- La espuma, basado en que la porosidad del producto se consigue mediante la introducción en la mezcla de sustancias que da mucha espuma en la masa al ser batida
- Lo químico, que comprende la adición de ciertas sustancias en la mezcla, sucede durante el moldeo se desarrollan los gases, que al salir de la mezcla lo dejan poroso. De acuerdo a estos métodos de fabricación tenemos una serie de materiales y sustancias utilizadas en la elaboración de los ladrillos y mezclas aislantes (Gingery, 2013)

2.6 Materiales metalicos

Para la fabricación de las estructuras, columnas de apoyo y las cubiertas se emplean: aceros laminados, perfiles, angulares entre otros. El acero laminado se emplea para los bastidores, parantes, zapatas, uniones de las piezas de la estructura, blindaje del horno, los conductos de gas o de aire. Las partes fabricadas de acero laminado no deben soportar temperaturas superiores a 500°C; en el caso contrario, rápidamente pierden su solidez, se oxidan, se comban y en fin quedan inutilizables. Los accesorios de los hornos, como las puertas, los marcos de las ventanas, chapas para fijar en ellos las toberas o los mecheros, preferiblemente deben ser fabricados de la fundición gris. Estos detalles preparados por el colado provocan menos cambios por dilatación y al ser

caldeados hasta más allá de los 500°C, no pierde su solidez con la dilatación. (Elez, 2016). Los detalles de acero son más fuertes que los anteriores, pero igual con los aceros laminados, pierden su estabilidad a la temperatura de 500°C. La fundición gris se emplea también para fabricar las partes del horno que soportan temperaturas considerables, por ejemplo, las varas de emparrillado, las puertas de los hogares del horno, las tapas etc

2.7 Transferencia de calor

Es el calor la energía que transita de un sistema a otro, siendo el resultado de la diferencia de la temperatura. Del estudio de la termodinámica sabemos que el calor es energía en tránsito que tiene lugar como resultado de las interacciones entre un sistema y sus alrededores debido a una diferencia de temperatura, de esta forma la transferencia de calor juega un papel importante, en lo que se refiere a las velocidades de transferencia de energía.

Existen tres formas de transferencia de calor, llamadas conducción, convección y radiación, cada uno de estas formas puede estudiarse de forma independiente. Pero en la práctica, en los hornos el calor se transmite por una combinación de las tres formas, si bien la mayoría de las aplicaciones en ingeniería, equipos de transferencia de calor como los intercambiadores de calor las calderas, los condensadores, los radiadores, los calentadores, los hornos, los refrigeradores y los colectores solares, están diseñados tomando en cuenta el análisis de transferencia de calor. Los problemas de esta ciencia que se encuentran en la práctica se pueden considerar en dos grupos: (Yunus & Cengel, 2003)

- **De capacidad nominal.**

Los problemas de capacidad nominal tratan de la determinación de la velocidad de transferencia de calor para un sistema existente a una diferencia específica de temperatura.

- **De dimensionamiento.**

Los problemas de dimensionamiento tratan con la determinación del tamaño de un sistema con el fin de transferir calor a una velocidad determinada para una diferencia específica de temperatura. (Conesa, 2013)

2.8 Principales formas de transferencia de calor

Con frecuencia en el ámbito de los estudios de ingeniería se encuentra las ciencias térmicas, dentro de ella se ubican la termodinámica y la transferencia de calor, es así que la segunda complementa a la primera. Por tanto, la termodinámica ve fundamental al sistema de equilibrio, basadas en leyes adicionales que permiten la predicción en relación al tiempo de la transferencia de energía, estas leyes complementarias están relacionadas con tres modos fundamentales de transferencia de calor como son: conducción, convección y radiación. (Agustin, 2011).

2.8.1 *Por conducción*

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas como resultado de interacciones de esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas de la retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres. (Agustin, 2011).

La velocidad de la conducción de calor a través del medio depende de la configuración geométrica de éste, su espesor y el material del que esté hecho, así como de la diferencia de temperaturas a través de la pared.

- ***Pared plana***

En la figura 2.5 se considera la conducción de estado estacionario de calor a través de la pared plana grande de espesor $\Delta x = l$ y área A. como se muestra en la ecuación 2.1.

La diferencia de temperatura o gradiente de temperatura entre una superficie y la otra es $\Delta T = T_2 - T_1$

Por lo tanto, podemos concluir que la razón de la conducción térmica a través de la capa es proporcional a la diferencia de temperatura a través ambas superficies de esta y el área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de cada capa.

Razón de conducción de calor = $\frac{(Area)(diferencia\ de\ temperatura)}{espesor}$ o bien.

$$Q_{cond} = kA \frac{T_2 - T_1}{\Delta x} = -kA \frac{\Delta T}{\Delta x} \quad \text{Ecuación 2.1}$$

Donde:

Q_{cond} = Flujo de calor o transferencia de calor por unidad de área. (W/m²)

k = Es una propiedad del transporte conocido como conductividad térmica y es una característica propia del material. (W/mK)

dT/dx = Gradiente de temperatura en la dirección x. (K/m)

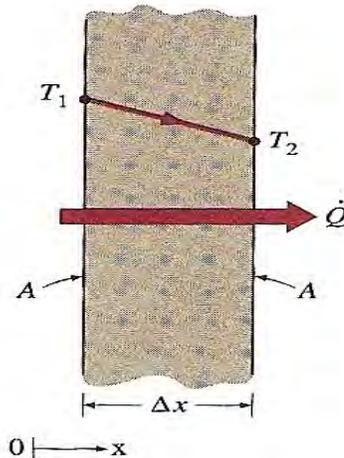
Donde la constante de proporcionalidad k es la conductividad térmica del material, que es la medida de la capacidad del material para conducir calor figura 2.5. En el caso

límite de $\Delta x \rightarrow 0$, la ecuación que acaba de darse se reduce a la forma diferencial (Agustin, 2011).

Conducción de calor a través de la pared de espesor y área

Figura 2.5

Conducción de calor a través de la pared de espesor y área



Nota: Yunus A. Çengel; 2003, pág.18

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

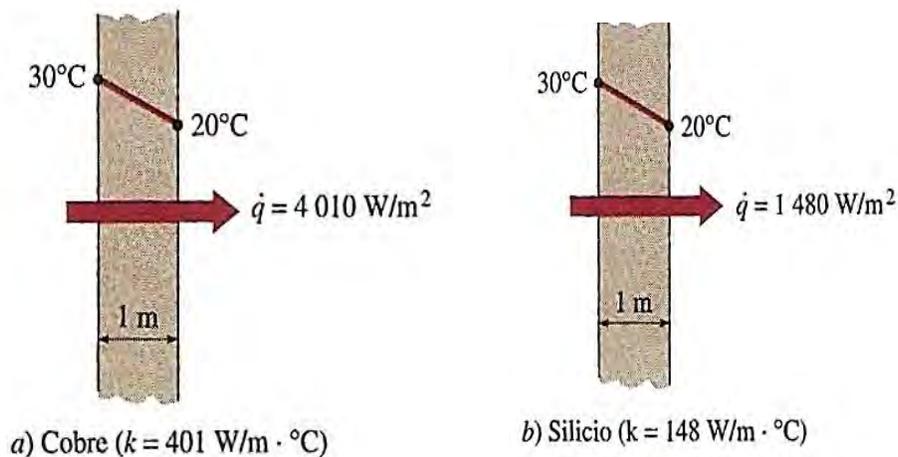
Ecuación 2.2

Conocida como la *Ley de Fourier de la Conducción de calor*, Aquí, dT/dx es gradiente de temperatura, $T - X$ (la razón de cambio de T con respecto a X), en la ubicación X . la relación antes dada indica que la razón de conducción del calor en dirección es proporcional al gradiente de temperatura en esa dirección. El calor es conducido en la dirección de la temperatura decreciente y el gradiente de temperatura se vuelve negativo cuando esta última decrece al crecer X . El signo negativo en la ecuación 2.2, garantiza que la transferencia de calor en la dirección X (positivo) sea cantidad positiva (Agustin, 2011).

La transmisión del calor por conducción en los hornos industriales se produce al dejar un material frío sobre una solera o crisol caliente. Si dos piezas de un material sólido están en contacto (no separadas por una capa de aire u otro fluido), las superficies de contacto alcanzan instantáneamente la misma temperatura, el cual se halla entre las temperaturas de los dos materiales en contacto.

Figura 2.6

La velocidad de conducción del calor en el sólido es directamente proporcional a su conductividad



Nota: Yunus A. Çengel; 2003, pág.18

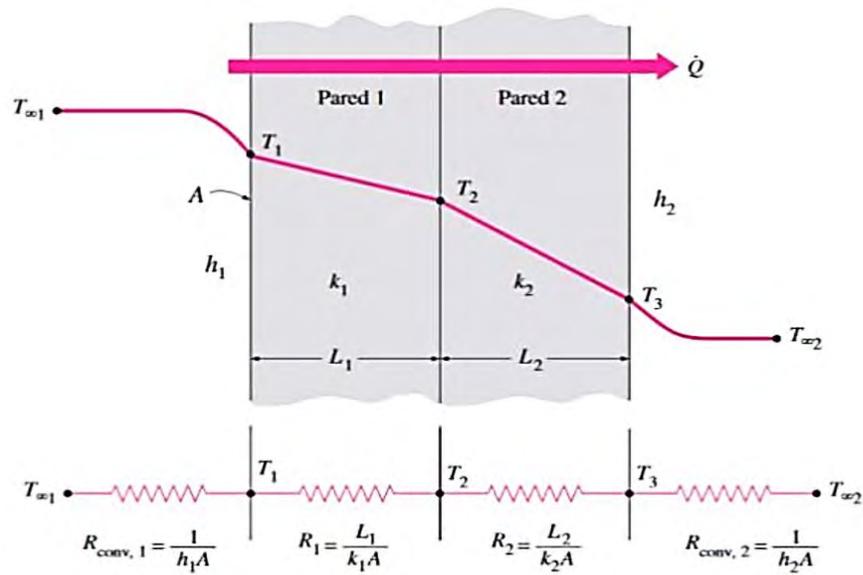
En la práctica se encuentran con frecuencia paredes planas figura 2.7, las cuales están compuestas de muchas capas, de materiales diversos, es por ello que se sigue empleando el concepto resistencia térmica con la finalidad de determinar la velocidad de trasmisión de calor, a través de las paredes compuestas, y la resistencia térmica de cada pared en contra de la conducción de calor viene dada por, L/kA conectadas en serie y aplicando la analogía eléctrica. Es decir, al dividir la diferencia de temperatura que existe entre las dos superficies a las temperaturas conocidas entre la resistencia térmica total que presentan ambas. (Champa, 2009).

El ordenamiento o configuración de la estructura de resistencias térmicas aplicando la analogía eléctrica con la transferencia de calor en el interior del horno basculante sería la siguiente:

(Ver Figura 2.8)

Figura 2.7

Perdida de calor en las paredes planas



Nota: Transferencia de calor; J. P. Holman; 1998, pág.19

Figura 2.8

Diagrama flujo de calor



Nota: Transferencia de calor; J. P. Holman; 1998, pág.20

$$Q = \frac{T_{\infty 1} - T_{\infty 2}}{R_{total}} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

Donde:

Q= Velocidad de transferencia de calor a través de la pared

$T_{\infty 1}$ = temperatura de la llama

$T_{\infty 2}$ = temperatura de la superficie de la chapa exterior de la chapa de acero.

R_{total} = Resistencia total por conducción

$$R_{pared} = \frac{L}{KA} \quad \text{Ecuación 2.4}$$

La resistencia total por conducción viene dada por:

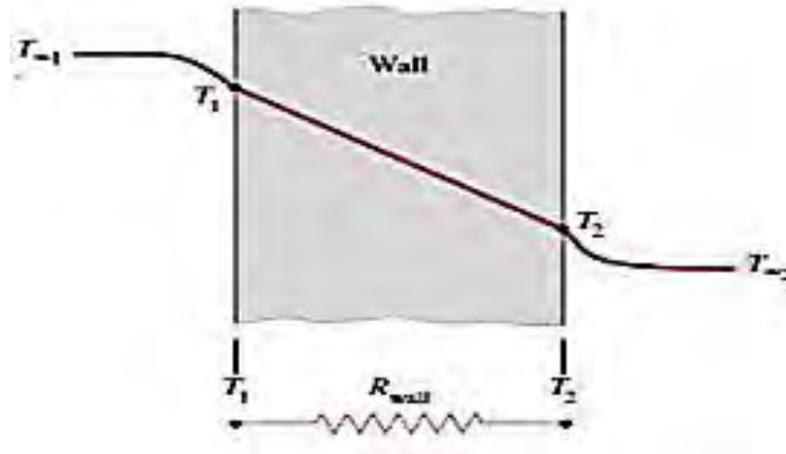
$$R_{total} = \frac{1}{hA} + \frac{L_1}{K_1A} + \frac{L_2}{K_2A} + \frac{L_3}{K_3A} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

Para la tapa superior del horno, se tomará solo el material refractario ya que, por facilidades de cálculo, la chapa de acero es tan delgada que se despreciaran las pérdidas por la misma, de esta forma tendremos:(ver figura 2.9)

La transferencia de calor en ciertas direcciones impulsada por el gradiente de temperatura en esa dirección. Por tanto, no habrá transferencia de calor en una dirección donde no hay cambios de temperatura. Las mediciones de la temperatura en varios lugares sobre la superficie interior o exterior de la pared confirmaran que la superficie de la pared es casi isotérmica. Considere la pared plana de espesor L y conductividad térmica promedio k, las dos superficies de la pared se mantienen a temperaturas constantes de T1 Y T2. Para conducción unidimensional de calor en estado estacionario a través de la pared tenemos T(x). Entonces, la Ley de Fourier de la conducción de calor para la pared se expresa:

Figura 2.9

Conducción de calor pared plana (tapa del horno)



Nota: Transferencia de calor; J. P. Holman; 1998, pág.20

$$Q_{cond\ pared} = \frac{T_1 - T_2}{R_{pared}} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

$$R_{pared} = \frac{L}{KA} \quad R_{total} = \frac{1}{hA} + \frac{L_1}{K_1A} + \frac{L_3}{h_2A}$$

Donde:

$Q_{cond\ pared}$ = razón de la transferencia de calor es por conducción.

- Pared Cilíndrica

La transmisión del calor por conducción en los hornos industriales se produce al dejar un material frío sobre una solera o crisol caliente. Si dos piezas de un material sólido están en contacto (no separadas por una capa de aire u otro fluido), las superficies de contacto alcanzan instantáneamente la misma temperatura, el cual se encuentra entre las temperaturas de los dos materiales en contacto (Riveros, 2011). La transferencia de calor estacionaria por medio de cascos cilíndricos o esféricos, de varias capas se puede manejar como en las paredes planas de capas múltiples, al sumar una resistencia adicional en serie por cada capa adicional

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 2.10. Las dos superficies de la capa cilíndrica se mantienen a las temperaturas constantes T_1 y T_2 . No hay generación de calor en la capa y la conductividad térmica es constante. Entonces la transferencia de calor por conducción a través de cuerpos cilíndricos se expresa como:

$$Q = 2 \pi L k \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

Donde:

Q = razón de transferencia de calor por conducción cilíndrica

r_1 = radio interno

r_2 = radio exterior

L = espesor

k = conductividad térmica

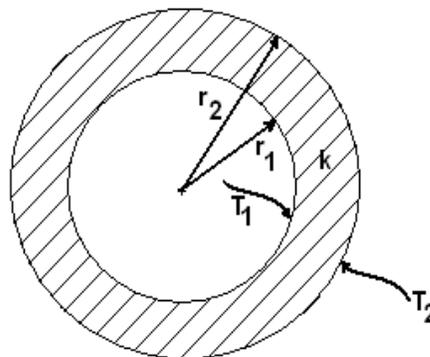
T_1 y T_2 = temperatura en las paredes

Y la resistencia térmica en este caso es:

$$R_{\text{ter}} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2 \cdot \pi \cdot k \cdot L} \quad \text{Ecuación 2.8}$$

Figura 2.10

Tubo cilíndrico, con temperaturas de las superficies interior y exterior especificadas



Nota: Transferencia de calor; Yunus A. Çengel; 2003, pág.146

La idea de resistencia térmica se puede emplear con paredes cilíndricas multicapa de la misma manera que en las paredes planas (figura 2.11):

$$Q = \frac{T_1 - T_4}{R_{total}} \quad \text{Ecuación 2.9}$$

$$Q = \frac{2\pi L(T_1 - T_4)}{\ln(r_2/r_1)/k_A + \ln(r_3/r_2)/k_B + \ln(r_4/r_3)/k_C} \quad \text{Ecuación 2.10}$$

$$Q = \frac{t_{\infty 1} - t_{\infty 2}}{R_{total}}$$

Donde la resistencia total (R_{total}) viene dado por:

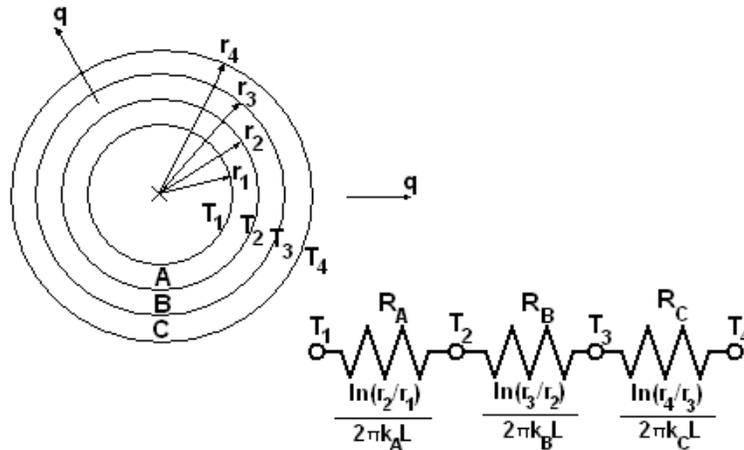
$$R_{cil} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi LK} = \frac{\ln(\text{radio exterior}/\text{radio interior})}{(2\pi(\text{Longitud})(\text{Conductividad térmica}))}$$

$$R_{total} = R_{conv,1} + R_{cil1} + R_{cil2} + R_{cil3} + R_{ci1.2} + R_{ci1.3} + R_{conv,2}$$

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{\ln^* r_2 / r_1}{2\pi L k_1} + \frac{\ln^* r_3 / r_2}{2\pi L k_2} + \frac{\ln^* r_4 / r_3}{2\pi L k_3} + \frac{1}{h_2 A_4} \quad \text{Ecuación 2.11}$$

Figura 2.11

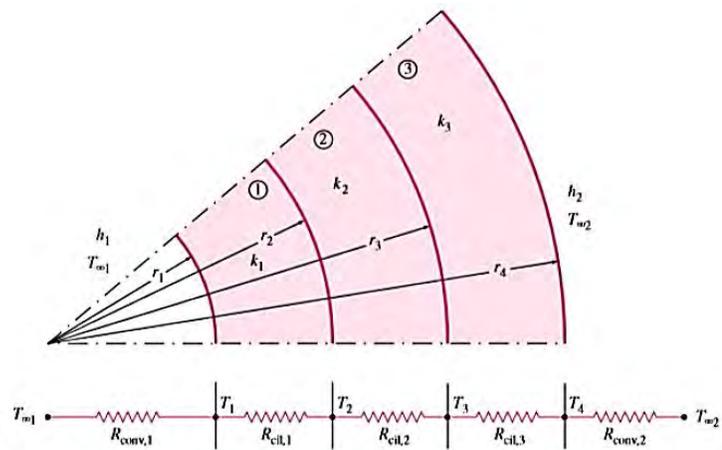
Flujo de calor a través de secciones cilíndricas múltiples y analogía eléctrica.



Nota: Transferencia de calor; J. P. Holman; 1998, pág.20

Figura 2.12

Flujo de calor a través de secciones cilíndricas múltiples



Nota: Transferencia de calor; J. P. Holman; 1998, pág.18

2.8.2 Por convección

Este tipo de transferencia de calor está compuesto de dos formas, además de la transferencia de energía a causa del movimiento molecular aleatorio, esta energía es transferida de un movimiento global o macroscópico del fluido. El hecho radica en que el movimiento del fluido en cualquier instante, en grandes números de moléculas se mueve en forma colectiva, tal movimiento con la presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor.

Las moléculas en el fluido mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia de calor se da por la superposición de transporte de energía debido al movimiento global del fluido y al movimiento aleatorio de las moléculas. (Pirobloc, 2016).

La transferencia de calor entre la superficie de una placa calentada y un fluido adyacente tal como se muestra en la figura 2.13 que presenta una interacción entre el fluido y la superficie en la presencia de una región, indicando la velocidad del fluido varía desde cero en la superficie aun valor infinito. (Incropera & De Witt, 1999).

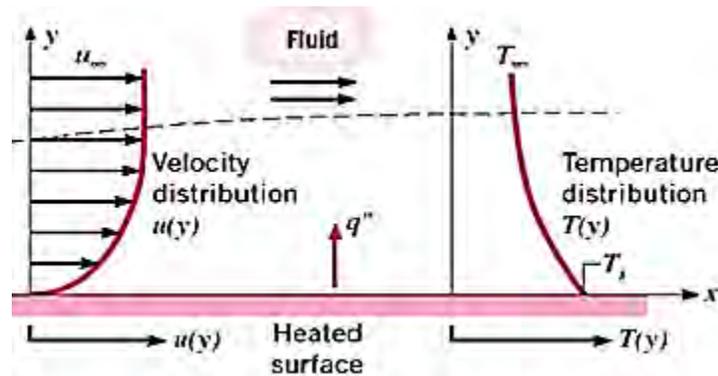
Esta región se la conoce como capa límite hidrodinámica o de velocidad si la temperatura

del fluido y la superficie son diferentes habrá una región en donde la temperatura T_s en $y = 0$ a T_{∞} en el flujo exterior, esta región conocida como capa límite térmica puede ser más pequeña, más grande o del mismo tamaño que aquella que varía la velocidad, en la cual si la temperatura superficial es mayor que la temperatura al ambiente ocurrirá la transferencia de calor por convección entre la superficie y el flujo exterior. (Incropera & De Witt, 1999).

La transferencia de calor por convección está compuesta por dos formas de transferencia por **convección forzada** cuando el flujo es causado por medio externo, por la **convección libre o natural**, el flujo es inducido por fuerzas de empuje que se origina por la diferencia de densidades ocasionadas y por la variación de temperaturas en el fluido.

Figura 2.13

Transferencia de calor por convección



Nota: Transferencia de calor Frank Incropera

El modelo matemático que ayuda a cuantificar la transferencia de calor por convección es:

$$Q'' = h A_s (T_s - T_a) \quad \text{Ecuación: 2.12}$$

Donde:

h = coeficiente de transferencia de calor por convección $W/m^2 \text{ } ^\circ C$

A_s = área superficial a través de convección m^2

T_s = temperatura de la superficie $^\circ C$

T_a = temperatura del fluido $^\circ C$

Esta expresión se le conoce como la ley de enfriamiento de Newton, la constante proporcional h se le conoce como coeficiente de transferencia de calor por convección. Esta constante está íntimamente vinculada con las condiciones de la capa límite, en las que la geometría de la superficie, la naturaleza del movimiento influye en su valor. Cualquier estudio de convección se reduce finalmente a un estudio de los medios por los que es posible determinar el constante h .

2.8.3 Por radiación

La radiación es la energía emitida por la materia en forma de ondas electromagnéticas o fotones, esto se debe al cambio en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas. A diferencia de la conducción y la convección, la transferencia de energía por radiación no requiere la presencia de un medio interpuesto. De hecho, la transferencia de energía por radiación es la más rápida y no sufre atenuación en el vacío. En todos aquellos estudios que se realizan sobre transferencias de calor es de interés de la radiación térmica, que es la forma de radiación emitida por los cuerpos debido a su temperatura. Mientras que estos cuerpos tengan temperaturas sobre arriba de cero absolutos podrán emitir radiación térmica sin tomar en cuenta la forma y estado de la materia, (Conesa, 2013).

La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas, mientras la transferencia de calor por conducción o convección requiere de la presencia de un medio material, la radiación no requiere la presencia de un medio por esta condición la transferencia de calor por radiación tiene mayor eficiencia en el vacío. En muchas aplicaciones es conveniente expresar el intercambio de calor por medio de radiación de la siguiente manera.

$$q_{rad} = h_r A (T_s - T_{air}) \qquad \text{Ecuación 2.13}$$

Valor de h_r corresponde al coeficiente de transferencia de calor por radiación.

$$h_r = \varepsilon\sigma(T_s + T_{air})(T_s^2 + T_{air}^2)$$

Ecuación 2.14

Donde

h_r = Coeficiente de transferencia por radiación

ε = corresponde a la emisividad que es característica propia de las superficies con un valor que se halla entre los límites 0 y 1.

Estos pasos indica de qué manera si mide la eficacia donde una superficie emite energía cuando está cerca de un cuerpo negro.

σ = Constante de Stefan Boltzmann con un valor de $(5,67 \times 10^{-8} \text{ W / m}^2 \text{ K}^4)$

Es un hecho corriente que la transmisión de calor de una llama es mayor que la de un gas puro que tiene la misma temperatura. La diferencia en la cantidad de calor transmitido es bastante notable en los hornos de calentar acero y aún mayor en los hornos de fusión de vidrio y en los de fusión de acero. La diferencia es tanto más pronunciada cuanto más elevada es la temperatura, puesto que, cuanto más elevada es esta, mayor es la energía radiante de cada molécula de gas, pero menor es el número de moléculas radiantes por unidad de volumen. Además, las bandas de radiación gaseosa mantienen su posición independiente de la temperatura, mientras que en el punto de máxima intensidad la radiación sólida se desplaza hacia longitudes de onda más corta, al aumentar las temperaturas. De aquí se desprende que, al aumentar la temperatura, la radiación de gases puros no puede crecer tan rápidamente como en la radiación de sólidos. (Conesa, 2013) (Maita, 2015).

Cuando una superficie de emisividad ε área superficial A_s que se encuentra a una temperatura superficial T_s que está completamente encerrada por una superficie mucho mayor (o negra) que se encuentra a la temperatura absoluta T_{alred} , y separada por un gas (como el aire) que no interviene con la radiación, la rapidez neta de transferencia de calor por radiación entre estas dos superficies se expresa por:

$$Q_{\text{rad}} = \varepsilon \sigma A_s (T_{s4} - T_{\text{alred4}})$$

Ecuación 2.15

Dónde:

Q_{rad} = transferencia de calor por radiación

Calor perdido por radiación de metal.

Las pérdidas que se dan por radiación del metal cuando este se encuentra líquido son a causa de la emisividad del metal ecuación 2.16, para poder determinarlas se trabaja como se señala a continuación. Se define la emisividad de un cuerpo negro y luego se multiplica por el coeficiente de emisividad del metal.

Se conoce que:

$$Q_n = \varepsilon \sigma A T^4$$

Ecuación 2.16

Dónde:

Q_n = Flujo de calor debido a la emisividad del metal líquido en KJ

σ = Constante de radiación $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

A = Área de superficie.

T = Temperatura de la superficie.

ε = Corresponde a la emisividad que es característica propia de las superficies con un valor entre los límites 0 y 1.

Calor perdido por la fuga de gases

Las pérdidas de calor que se producen por los gases que salen por la tapa del horno, se producen por radiación y convección. Son pequeñas en los hornos eléctricos. En los hornos con combustible se presenta invariablemente una cierta pérdida de calor, porque

estos hornos funcionan con una presión interior al nivel de la solera en la cámara de calentamiento. La razón de este método de funcionamiento estriba en que una pequeña pérdida de los gases, que salen al exterior, es menos perjudicial que la oxidación (y enfriamiento) que se produce por la infiltración del aire al interior del horno. Si la tapa está montada herméticamente, la pérdida necesaria no supera el 2% del calor total aportado al horno. Con un montaje holgado de las puertas y con la llama o los chorros de gases proyectándose contra las mismas, la pérdida puede alcanzar el 8% e incluso superar este valor (Rosero, 2006).

Debe hacerse una distinción entre la cantidad de gases que escapan por las puertas y el calor disponible sacado por estos gases. Si la combustión se ha en los hornos discontinuos al escapar los gases por las puertas. Por otro lado, si la combustión no ha sido completada, existe una pérdida de calor, porque los gases completan su combustión fuera del horno.

2.9 Conductividad termica

Los distintos materiales almacenan el calor de manera distinta, por ello se ha conceptualizado la propiedad de calor o C_p , (**calor específico**) como medida de la capacidad del material para almacenar energía térmica. Por ejemplo $C_p = 4.18 \text{ kJ/kg. } ^\circ\text{C}$, para el agua y $C_p = 0.45 \text{ kJ/kg. } ^\circ\text{C}$, para el hierro, a la temperatura ambiente, indica que el agua puede almacenar casi 10 veces más energía que el hierro por unidad de masa. De igual manera, la **conductividad térmica** k , es medida por la capacidad del material que tienen de conducir calor. El transporte del calor por la conducción en condiciones estacionaria también se puede concebir como una ecuación que defina la conductividad térmica por lo cual la conductividad térmica del material se puede definir

como la razón de transferencia de calor a través del espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura (Yunus & Cengel, 2003).

Por ejemplo $k=0.607 \text{ w/m.C}^\circ$, para el agua y $k=80.2 \text{ w/mC}^\circ$, para el hierro, a la temperatura ambiente indica que el hierro conduce el calor, de 100 veces más rápido que el agua. Por lo tanto, se dice que el agua es mala conductora del calor en relación con el hierro, aun cuando el agua en el medio excelente para almacenar energía térmica. (Yunus & Cengel, 2003)

La conductividad térmica de la materia por lo tanto se puede definir como una medida de la capacidad del material para conducir calor, el valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es buen conductor del calor y el valor bajo indica que es mal conductor o que es aislante. En la tabla 2.5 y anexo 1 y 2 se dan las conductividades térmicas de algunos materiales comunes a la temperatura ambiente. (Yunus & Cengel, 2003).

Tabla 2.5

Conductividad térmica de algunos materiales a temperatura ambiente

Material	k, W/m. °C*
Diamante	2 300
Plata	429
Cobre	401
Oro	317
Aluminio	237
Hierro	80.2
Mercurio (1)	8.54
Vidrio	0.78
Ladrillo	0.72
Agua (1)	0.613
Caucho suave	0.13
Fibra de vidrio	0.043

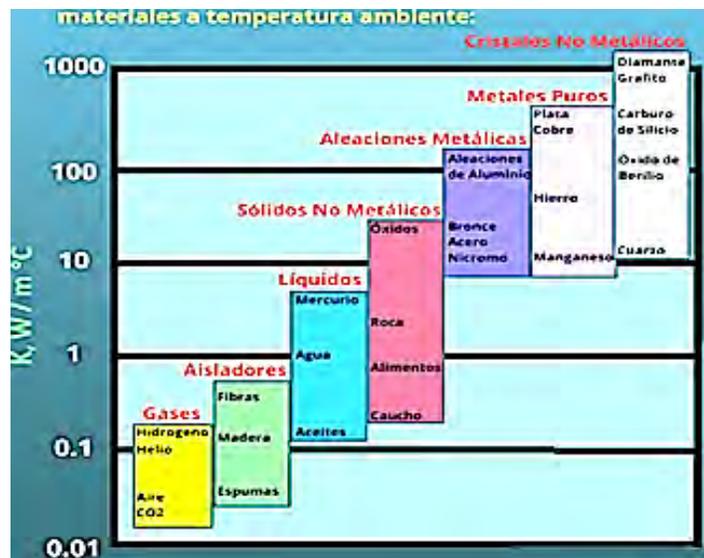
multiplíquese por 0.5778 para convertir a Btu/h ft. °F.

Nota: Yunus A. Çengel; 2003, pág.398

Las conductividades térmicas de los materiales varían con la temperatura. La variación de la conductividad térmica sobre ciertos rangos de temperatura es despreciable para algunos materiales, pero significativamente para otros, como se muestra en la figura 2.14 y 2.15. Las conductividades térmicas de ciertos solidos exhiben incrementos sorprendentes a temperaturas cercanas al cero absoluto cuando estos se convierten en superconductores.

Figura 2.14

Rango de la conductividad térmica de diversos materiales



Nota: <https://web.facebook.com/ReactorQuimicoMX/posts>

2.10 Difusividad termica

Se puede encontrar con frecuencia el análisis de la transferencia de calor como es el caso del producto ρC_p al cual se definir como aquella capacidad calorífica del material como es el calor específico C_p como la capacidad calorífica ρC_p que representa la capacidad de almacenamiento del calor del material Pero C_p la expresa por unidad de masa, en tanto que ρC_p la expresa por unidad de volumen, como se puede observar a partir de sus unidades $J/kg.C^\circ$ y $J/m^3.C^\circ$ respectivamente. Otra propiedad de los materiales que aparece en el análisis de la conducción del

calor en régimen transitorio es la difusividad térmica, la representa cuán rápido se difunde el calor por el material y se define material el cual se puede definir en la siguiente ecuación (Yunus & Cengel, 2003).(ecuación 2.17)

$$\alpha = \frac{\text{calor conducido}}{\text{calor almacenado}} = \frac{k}{\rho c_p} \quad \text{Ecuación 2.17}$$

donde:

k = conductividad termica

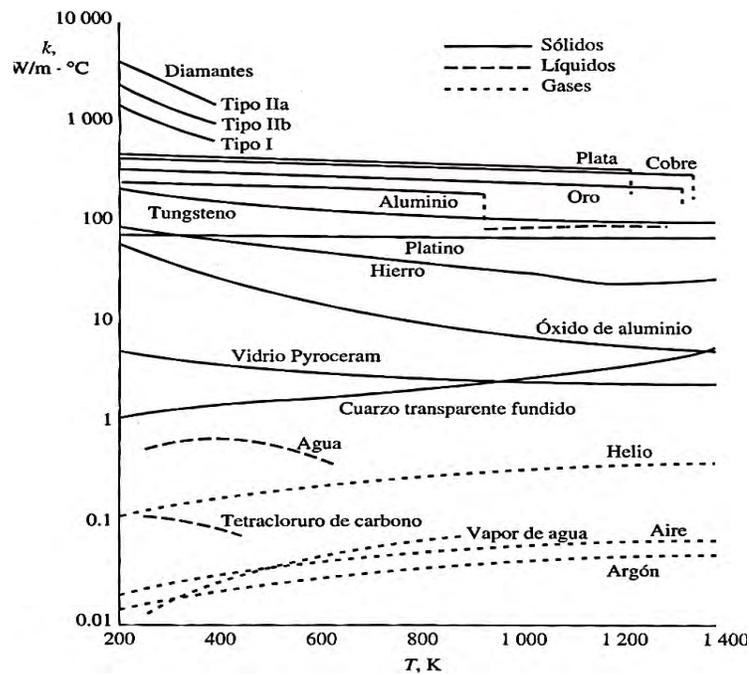
ρ = densidad

c_p = calor especifico

α = difusividad termica

Figura 2.15

Cuadro variación de la conductividad térmica en diversos materiales



Nota: Yunus A. Çengel; 2003, pág.403

La difusividad térmica del material se entiende como la razón entre el calor conducido a través del material almacenado por unidad de volumen ver tabla 2.6. Es claro que el material que

tiene alta conductividad térmica o baja capacidad calorífica tiene una gran difusividad térmica. Lo que quiere decir, en su mayor parte, el calor es absorbido por el material y una pequeña cantidad de ese calor será conducido todavía más

Tabla 2.6

Difusividades térmicas de algunos materiales a la temperatura ambiente

Material	α (m ² /s)	Material	α (m ² /s)
Plata	149 x 10 ⁻⁶	Concreto	0.75 x 10 ⁻⁶
Oro	127 x 10 ⁻⁶	Ladrillo	0.52 x 10 ⁻⁶
Cobre	113 x 10 ⁻⁶	Suelo macizo	0.52 x 10 ⁻⁶
Aluminio	97.5 x 10 ⁻⁶	Vidrio	0.34 x 10 ⁻⁶
Hierro	22.8 x 10 ⁻⁶	Lana de vidrio	0.23 x 10 ⁻⁶
Mercurio	4.7 x 10 ⁻⁶	Agua	0.14 x 10 ⁻⁶
Mármol	1.2 x 10 ⁻⁶	Carne de res	0.14 x 10 ⁻⁶
Hielo	1.2 x 10 ⁻⁶	Madera	0.13 x 10 ⁻⁶

Nota: Yunus A. Çengel; 2003, pág.146

2.11 Procesos de combustión

Por combustión se puede entender como aquel proceso en el cual se da la oxidación rápida de un combustible y un oxidante, y esta viene acompañada de liberación de energía, la cual se aprovecha en diferentes procesos industriales. (Rossana, 2020)

En toda combustión existe un elemento que arde llamado combustible y otro que produce la combustión conocida como comburente, generalmente oxígeno en forma de O₂ gaseoso. El proceso de destruir materiales por combustión se conoce como incineración. Para iniciar la combustión de cualquier combustible, es necesario alcanzar una temperatura mínima, llamada temperatura de ignición, que se define como, en °C y a 1 atm, temperatura a la que los vapores de un combustible arden espontáneamente. La temperatura de inflamación, en °C y a 1 atm es aquella

que, una vez encendidos los vapores del combustible, éstos continúan por si mismos el proceso de combustión.

2.11.1 Tipos de combustión

La finalidad de la combustión es que se pueda conseguir la oxidación total del carbono y del hidrógeno para así poder formar dióxido de carbono (CO_2) y agua (H_2O). Es de esta forma que se llega a producir una máxima energía en forma de calor por consecuencia hace que existan cualquier tipo de daño al medio ambiente. En relación a la combustión esta se califica por la calidad de sus productos, así como por la forma en que se realiza. (Rossana, 2020).

En función de sus productos

Se puede considerar los siguientes tipos de combustión:

- a) Combustión perfecta (estequiométrica)
- b) Combustión completa (con exceso de aire)
- c) Combustión incompleta (con defecto de aire)
- d) Combustión imperfecta (pseudo combustión)

a) Combustión Perfecta (Estequiométrica)

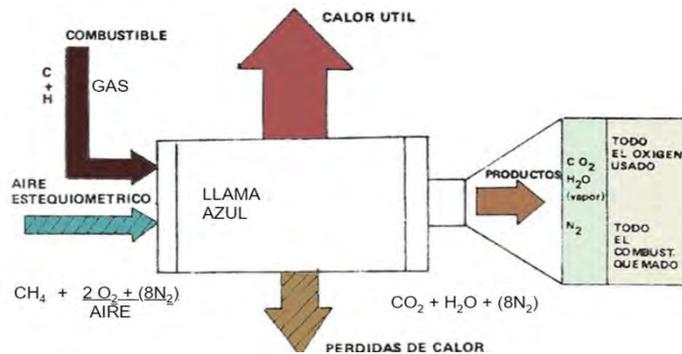
La combustión perfecta Estequiométrica se produce mezclando y quemando las cantidades suficientes de combustible y de oxígeno, estos se queman de manera perfecta y completa (Castillo P. , 2015) (ver figura 2.16)

Esta combustión completa está, sin embargo, fuertemente limitada por condiciones químicas y físicas, debido a que solo en la teoría se puede hablar de reacciones perfectamente estequiometrias. Se plantean para realizar los cálculos

teóricos de la combustión, etc. en función de la composición del combustible y el comburente que se utilizó (Castillo P. , 2015)

Figura 2.16

Combustión perfecta estequiométrica



Nota: manual práctico de combustión industrial Castillo pág. 27

b) Combustión completa con exceso de aire

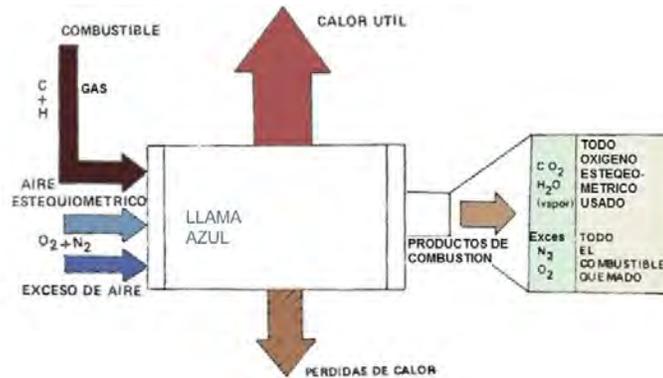
Para evitar la presencia del monóxido de carbono (CO) entre los gases productos de la combustión y esta se produzca de forma completa, se requiere que se planteen una proporción de oxígeno que esté por encima de la teoría. Esta forma de exceso de aire puede llevar 2 efectos que son necesarios en el proceso de la combustión (Castillo P. , 2015).(ver figura 2.17)

La temperatura máxima puede disminuir cuando se incremente la cantidad de gases en la combustión además hay una variación sensible en cuanto a la concentración de los óxidos formados con relación al nitrógeno, lo cual se puede traducir que la eficiencia de la combustión disminuye. El exceso de aire se expresa en porcentaje restándole el teórico estequiométrico, el cual corresponde al 100%; es decir, una cantidad de aire de combustión del 120% respecto requerido estequiométricamente, y este se expresará como 20% de

exceso de aire. El índice de exceso de aire (n), también empleado en la práctica, será en este caso: $n = 1.2$. (Castillo P. , 2015).

Figura 2.17

Combustión completa con exceso de aire



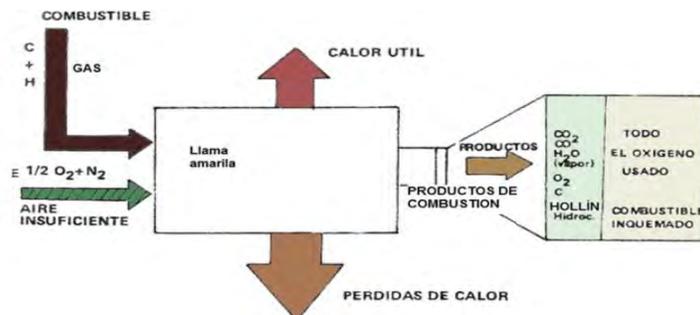
Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pág. 28

c) Combustión incompleta con defecto de aire

Si para la formación del dióxido de carbono CO₂, agua H₂O y dióxido de azufre SO₂ el oxígeno es escaso y no alcanza el valor teórico, la combustión es necesariamente incompleta, que pueden hacer aparecer en los gases de combustión el monóxido de carbono, hidrogeno y partículas sólidas de carbono, azufre o sulfuros (Castillo P. , 2015).(ver figura 2.18)

Figura 2.18

Combustión incompleta con defecto de aire



Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pág 29

Se puede considerar que los elementos de los gases que se pueden eliminar en la atmósfera contienen aún apreciable contenido calorífico, asimismo las pérdidas por combustión incompleta son altas cuando hay menos aire del necesario. La presencia de inquemados nos muestra el exceso de aire necesario. La existencia de CO en los humos además genera un riesgo de explosión, al llegar a atmósferas súbitamente oxidantes. El porcentaje del 1% de CO en los gases produce una pérdida de aproximadamente del 4% del poder calorífico del combustible.

d) Combustión imperfecta

Surge una combustión imperfecta o pseudocombustión oxidante cuando aun cuando hay demasía de aire no se llega a completar las reacciones de combustión, y de esta forma teniendo presencia en los humos de chimenea productos de combustión incompleta, como lo son los inquemados, residuos de combustibles sin oxidar, partículas sólidas, etc. Ahora se puede ver que este tipo de combustión suele producirse por una alta carga térmica del hogar, en otras palabras, por la relación entre la potencia calorífica y el volumen del hogar, pues existe poco tiempo de permanencia. (ver figura 2.19)

La escasa turbulencia, existiendo por tanto una mala mezcla aire-combustible, lo que en muchos quemadores se produce por cantidad insuficiente de aire o por estar trabajando a una fracción muy pequeña de su potencia nominal.

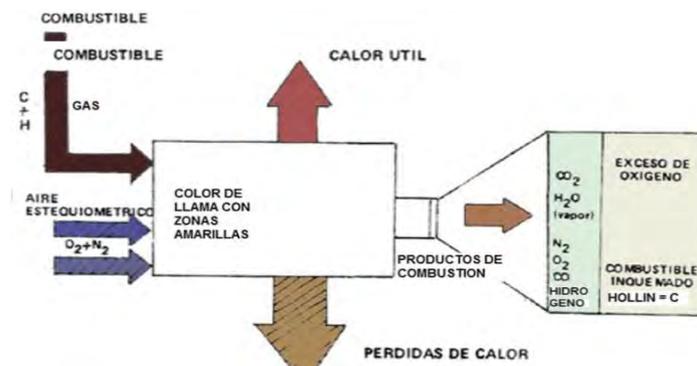
La falta de uniformidad de pulverización en los combustibles líquidos, ya que cuanto mayor sea el número de gotas de gran tamaño, tanto más fácil es que se produzcan inquemados, puesto que una gota de gran diámetro necesita un tiempo mayor de permanencia para quemarse por completo.

El enfriamiento de la llama, lo que puede ocurrir cuando la mezcla aire-combustible incide sobre superficies relativamente frías, como el frente de la cámara de combustión o las paredes de un tubo de llama y también cuando se trabaja con un gran exceso de aire. El alto porcentaje de carbono en los combustibles.

En la práctica, este es el tipo de combustión más común por resultar más ajustado a la realidad. En la medida que se mejore la combustión imperfecta aproximándose a las condiciones teóricas de combustión completa con mínimo exceso de aire, se logrará mejores rendimientos y se evitará efectos contaminantes. (Castillo P., 2015).

Figura 2.19

Combustión imperfecta



Nota: manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira *pág.* 30

1.1.1 *Formación de la llama*

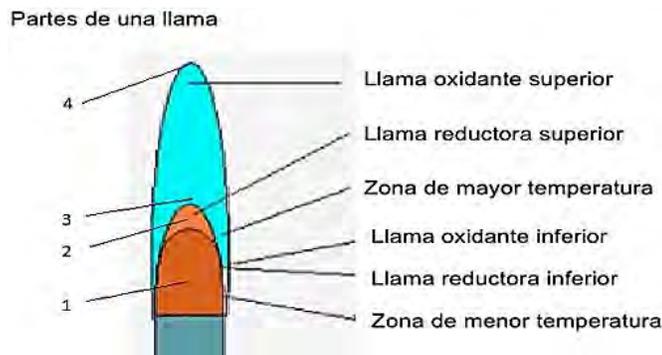
El proceso de la combustión y la formación de la llama en el interior del reactor o cámara de combustión constituye un fundamentalmente un problema de mecánica de fluidos con los que podemos, a través de ellos controlar a través de la intensidad de mezcla la cinética de la reacción de combustión, en la forma que permita establecer las condiciones más favorables y adecuadas de transferencia de calor. La comprobación práctica de que siempre se cumplen los postulados de la teoría inorgánica de la combustión, nos conduce a una visión diferente, más simple y objetiva, de

la combustión industrial. Se pueden establecer 4 etapas en el desarrollo del proceso de combustión: (Castillo P. , 2015). (ver figura 2.20)

- 1 Mezcla de combustible y comburente
- 2 Ignición y encendido de la mezcla
- 3 Reacción química
- 4 Difusión de los productos de la combustión

Figura 2.20

Formación de llama y gasodinámica de la combustión



Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pág. 44

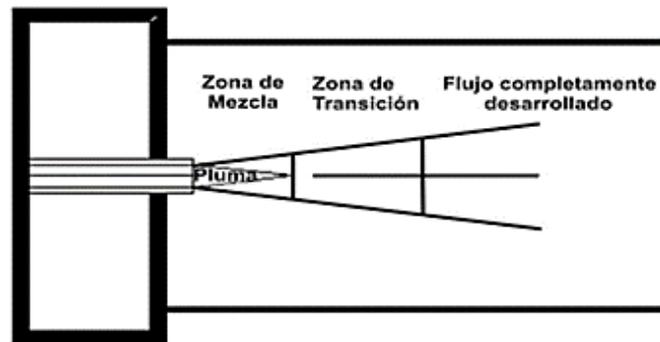
La ignición y las reacciones químicas son muy rápidas a diferencia de las mezclas y la difusión de los gases son lentas difíciles y engorrosos. Dentro de la cámara de combustión, la combustión se puede manejar como aquella en la que se suspende las partículas de carbón en el aire y que en el momento en el que reaccionan liberan calor y generan gases de combustión (Castillo P. , 2015).

Para conocer más precisamente cuales son los factores que afectan la formación de llama en el campo de la mecánica de fluidos, analicemos la gasodinámica de la combustión. El flujo que emerge de una tobera forma un chorro que actúa dinámicamente sobre el ambiente que lo rodea, perdiendo velocidad y succionando aire o gases de los alrededores. El chorro se proyecta en la

dirección prevista. En un chorro libre la presión estática es constante, mientras que en un chorro confinado la presión se incrementa con la distancia de la tobera ocasionando la formación de una zona de recirculación (Castillo P. , 2015).

Figura 2.21

Chorro en el espacio libre



Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pag 45

Un chorro en un espacio libre se compone de las 4 partes que se muestran en la figura 2.21.

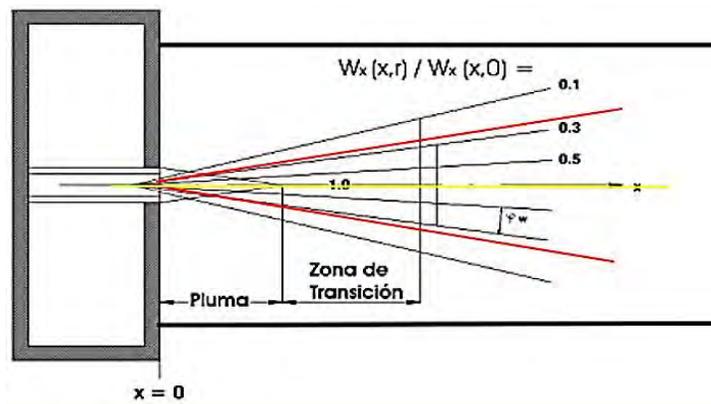
- Corazón o núcleo del chorro
- Zona de mezcla
- Zona de transición
- Chorro completamente desarrollado

La región del núcleo se puede definir por su velocidad constante y concentración similar a la de esta tobera. Fuera de esta zona se desarrolla una capa límite en la cual momento y masa se transporta en forma perpendicular al flujo. La longitud del núcleo es 4 o 5 veces el diámetro de la tobera. La región transitoria que puede alcanzar unos 10 diámetros precede a la formación del chorro final. La forma del chorro se caracteriza por el ángulo mitad, el cual se forma entre el eje del chorro y la línea formada por los puntos en los cuales la velocidad es la mitad de la velocidad en el eje. El cual se puede observar en la figura 2.22 (Castillo P. , 2015).

Contando el punto medio entre la tobera y la proyección del chorro que toca la pared del horno, este chorro se puede considerar y comportarse como chorro confinado es por ello que se hace presente la recirculación de los gases incinerados.

Figura 2.22

Angulo de quemados de forma de chorro



Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pág. 47

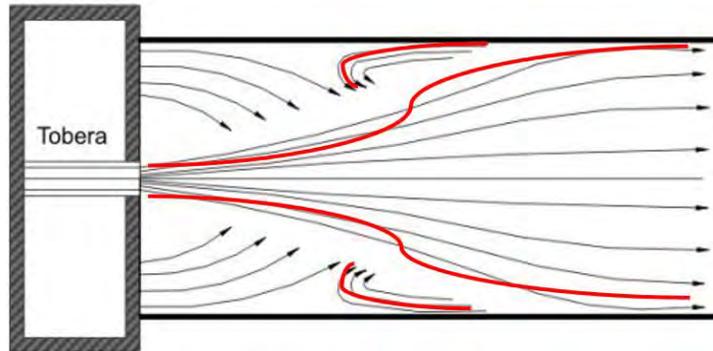
El chorro incrementa la presión donde se produce una recirculación de gases quemados a la zona exterior donde la llama tiene una forma cónica, su ángulo mitad es de aproximadamente del Angulo 4.85° , a unos tres diámetros del chorro se deberá producir el impacto de la llama en las paredes del horno (Castillo P. , 2011). (ver figura 2.23)

Así mismo, en la situación cuando el quemador tiene la energía cinética suficiente, para mantener formada la llama y la cinética de reacción es suficiente mente rápida para completar la combustión en este trayecto al punto P, impactaran los gases quemados y la llama será ideal, en caso contrario si la combustión no se completa en el punto P, la llama impactara consigo misma y ocasionara problemas, para evitarlo se resta potencia al quemador, por lo que resultara en una pérdida de velocidad en el chorro, y se igualan las velocidades con el aire secundario restante y los gases quemados, la llama se desarma antes de impactar y la combustión se completará dentro de

la masa uniforme de los gases circulando a través del tubo del horno sin ningún control, dando lugar a pegaduras, anillamientos y la presencia de inquemados a la salida del horno, debido a que la posibilidad de combustión completa desaparece.

Figura 2.23

Formación de chorro con recirculación de gases

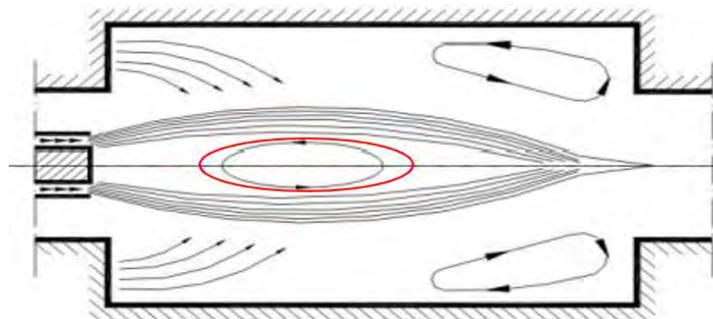


Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pág. 47

Al incorporar un tubo central convirtiendo el ducto en un espacio anular se crea una depresión en el centro que propicia que se produzca la recirculación interior de gases quemados calientes que se utiliza en algunos casos para estabilización de la llama. Este efecto se incrementa al proporcionar radialidad al flujo (Figura 2.24). (Castillo P. , 2011)

Figura 2.24

Perfil del flujo por efecto de la radialidad proporcionada



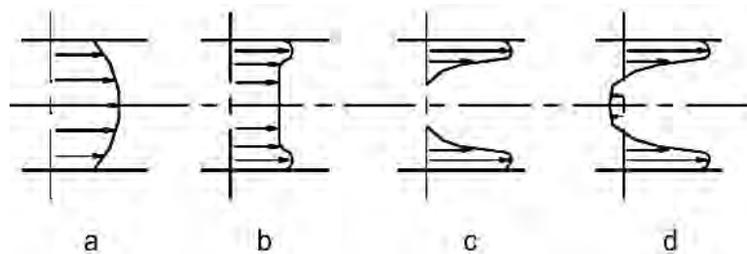
Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pag 48

Cuando se imprime rotación a un fluido se consiguen los chorros giratorios que modifican su perfil de velocidades por efecto de la rotación, como se muestra en la Figura 2.25.

En (a) no existe rotación; en (b) hay una rotación ligera que hace aumentar la velocidad periférica y deprime la central; en (c) se alcanza el umbral crítico, anulándose la velocidad en el centro; en (d) el estado es supercrítico, con inversión de velocidades en el centro.

Figura 2.25

Perfil del flujo por efecto de la rotación proporcionada



Nota: Manual práctico de combustión industrial Ing. Percy Castillo Neira pág. 49

La segmentación del flujo dominante, el aire primario, y/o gas natural en referencia a los componentes axial y radial se adapta para poder controlar la forma y tendencia de la llama en el interior de la cámara de combustión lo que a su vez resulta a los siguientes propósitos importantes:

- Formar la llama para así aprovechar el volumen útil de la cámara de combustión
- Disponer de máxima potencia calorífica
- Establecer la intensidad de la mezcla para una correcta combustión total

Para mantener el equilibrio entre la velocidad de los gases y la propagación de la llama resultan de fundamental importancia las tres T_e 's clásicas de la combustión, esto es, tiempo, turbulencia y temperatura. La estabilidad del frente de llama permite condiciones iniciales favorables, pero en el desarrollo de la combustión intervienen otros parámetros que establecen

condiciones que afectan la estabilidad inicial conseguida y coincidentemente, también comienzan con la misma letra: transferencia de calor y transporte de gases, tiro que crea las condiciones de circulación de gases y la tensión (presión) en el interior de la cámara de combustión, estos tres factores resultan de la mayor importancia para mantener en equilibrio la reacción de combustión.

El tiempo determina la velocidad con la que se efectúa la reacción y resulta fuertemente determinado por el tamaño de la partícula de carbón; si se eleva la temperatura de la llama, aumentará la velocidad de reacción y con ella la generación de calor; aumentará el volumen de productos de combustión, incrementándose la turbulencia en la llama, tomando en cuenta que la mezcla también será influenciada por la trayectoria de la partícula de carbón, el aumento de la Turbulencia favorecerá la cinética de la reacción, disminuyendo el Tiempo de reacción; la mayor generación de calor producirá un incremento de Temperatura (Castillo P. , 2011)

2.12 Calentamiento en hornos de fundición

2.12.1 *Flujo térmico en hornos industriales*

Cantidad de calor a impartir a la carga

Para el calentamiento y fusión de metales sólidos en un horno, la parte más importante es que se libere o desprenda calor en el mismo. Seguidamente de debe transferirse al material a trabajar y finalmente distribuirse en el total de la carga satisfaciendo las especificaciones de la ingeniería metalúrgica. Entre estas especificaciones podemos mencionar la temperatura final de la carga, la homogeneidad de temperatura en la misma el tiempo necesario para este.

Al igual se especifica, en algunos casos, la velocidad de calentamiento y la velocidad de enfriamiento (Trinks, 1975, p 30).

Para un mayor entendimiento de los procesos de fundición se recomienda iniciar con las características físicas del material que se ha fundir. El calor a transmitirse a la carga es equivalente al producto del peso de la carga por el aumento de temperatura y por el calor específico de la carga, el cual se expresa mediante la ecuación 2.18

$$Q = C_p M \Delta t \qquad \text{Ecuación 2.18}$$

Donde:

Q: calor adsorbido por la carga

M: masa de la carga

C_p: calor específico de la carga

Δt: elevación de temperatura de la carga

En caso se empleen el horno para el calentamiento de materiales, en los que las temperaturas elevadas producen reacciones químicas, deberán tenerse en cuenta los calores específicos y de reacción de la carga.

2.12.2 Interacción térmica en los hornos.

En la figura 2.26 se muestra cómo se transmite el calor en el interior de un horno de crisol, representando un horno que se calienta por el flujo de la combustión y la llama. Los elementos superficiales de las paredes y de la carga, como 3 y 6, se calientan por convección por los gases calientes que fluyen a lo largo de las paredes y de la carga. Una molécula de estos gases, tal como la que se indica por 9, radia en todas direcciones, por ejemplo, a 2 y a 8.

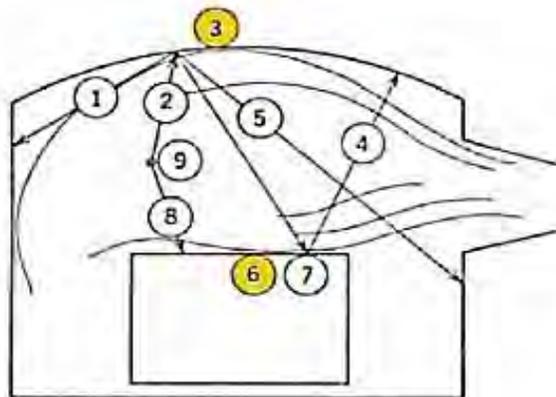
Estos elementos superficiales radian en todas las direcciones posibles, por ejemplo, de arriba hacia abajo por la boca del crisol. Los elementos superficiales radian en todas las direcciones posibles, calentando todas las paredes internas

De la figura 2.26 se desprende que cada partícula de los productos de la combustión, así como cada elemento de las superficies de las paredes y de la carga, radian en todas direcciones posibles. Este hecho hace extremadamente dificultoso el cálculo exacto de la transmisión de calor en un horno que se calienta por medio de un combustible. La prueba de la exactitud de esta afirmación está proporcionada por variables como (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) *pág. 58*

- Temperatura, composición y velocidad de los productos de combustión
- Espesor de gases entre las paredes y la carga
- Relación entre la superficie de la pared y la superficie expuesta de la carga
- La radiación térmica de las paredes y la carga

Figura 2.26

Diagrama de transmisión de calor en el interior de la cámara de un horno



Nota. Tomado de Hornos industriales (*pág 58*), por Trinks, W y Mawhinney, M. H.; 1975, Urmo, S.A. 57

2.13 Capacidad de calentamiento de los hornos

La capacidad de calentamiento de un horno generalmente se expresa por la masa de material a fundir en una determinada unidad de tiempo temperatura final, sin que se produzca un

sobrecalentamiento de la carga. Así mismo es importante la capacidad de calentamiento por unidad de volumen. La capacidad de calentamiento específico se expresa de las dos formas siguientes como se muestran en las ecuaciones 2.19 y 2.20 (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 63

$$\frac{\text{masa calentada}(kg)}{\text{hora}(h) \times \text{volumen del horno}(m^3)} = \text{Ecuación 2.19}$$

$$\frac{\text{masa calentada}(kg)}{\text{hora}(h) \times \text{superficie de la solera}(m^2)} = \text{Ecuación 2.20}$$

2.14 Variables que afectan el calor absorbido por la carga

Con una cantidad adecuada de calor liberado, y a una temperatura lo suficientemente elevada, la capacidad del horno está afectada por las siguientes variables:

1. La temperatura de las paredes del horno cuando se introduce la carga fría.
2. La temperatura a la que se ha de calentar la carga.
3. La temperatura de productos de combustión.
4. La emisividad de productos de combustión.
5. La emisividad de las paredes.
6. La emisividad de la carga.
7. La relación de la superficie de las paredes a la superficie de la carga.
8. El espesor de la capa de gases productos de combustión.
9. La conductividad térmica de la carga (incluyendo los espacios vacíos).
10. La uniformidad de la temperatura deseada en el producto.
11. El volumen de la carga.
12. Las dimensiones del horno (superficie y volumen de la solera).
13. Velocidad de los gases en el horno.

2.15 Rendimiento del horno

El término “rendimiento” de un horno industrial, es el costo de calentamiento por unidad de peso de producto acabado o listo para el siguiente proceso u operación. “El costo de calentamiento incluye el costo del combustible, el costo de fabricación del horno, los costos de mantenimiento y reparación. finalmente incluye el costo de la manipulación del material dentro y fuera del horno” (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 122

El rendimiento térmico del horno se expresa por la siguiente relación, ecuación 2.21:

$$\frac{\text{calor aportado ala carga}}{\text{combustible consumido para calentar la carga}} * 100\% \quad \text{Ecuación 2.21}$$

En los hornos eléctricos, el denominador de esta relación es reemplazado por el valor térmico de la energía eléctrica consumida.

Los rendimientos de hornos industriales en ocasiones son tan bajos como 5% en los hornos de combustión, y mayor aun en los hornos eléctricos. La diferencia que existente entre el rendimiento de las calderas y los hornos industriales, se debe a la temperatura final del material a calentar o fundir.

En condiciones óptimas y adecuado funcionamiento del horno industrial se pueden obtener rendimientos de hasta 68%, los gases son capaces de transferir calor a la carga únicamente si están más calientes que ella (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 123

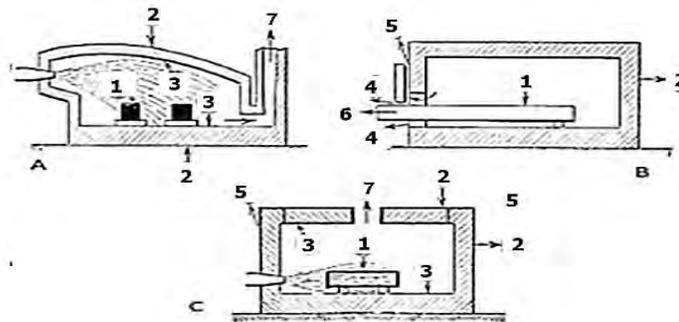
2.16 Distribución de calor en los hornos.

La mayor porción de calor se libera en la zona de combustión a la izquierda y se desplaza, de allí, a la derecha. El paso de calor a la carga se indica por las flechas, Figura 2.26. Pero el calor se moviliza en distintas direcciones; pasa a través de las paredes del horno y a través de la solera, como se indica por las flechas 3, incrementando la temperatura de estas partes, como se muestra

en la figura 2.27 (A). Otra porción se disipa en el ambiente por radiación y convección desde la superficie exterior de las paredes o por conducción al suelo como se muestra en las flechas 2. Se transmite calor por radiación a través de grietas u otras aberturas, flechas 4 como se muestra en la figura 2.27(B); los gases del horno abandonan este por la puerta 5, frecuentemente, disipándose al aire libre y transportando calor como se muestra en la figura 2.27(C). Se pierde calor cada vez que se abre la puerta.

Figura 2.27

Flujo de calor en los hornos



Nota. Adaptado de Hornos industriales; por Trinks, W.; Mawhinney, M. H.; 1975, P.125;

Además, existen pérdidas especiales que son características de diversos tipos de hornos; por ejemplo, en la figura 2.27 (B), en un horno que calienta solo una parte de una pieza larga de metal, el calor pasa a lo largo del metal desde la parte que está en el horno a la parte que esta fuera, disipándose en el ambiente 6, finalmente sale calor con los productos de combustión en dirección de la flecha 7. Para conseguir que la fracción de calor total que es transferida a la carga sea tan grande como sea posible con un calentamiento correcto, se necesita la resolución de dos dificultades: primero, determinación de las pérdidas de calor y los métodos de reducir esta, y segundo, determinación de cantidad de combustible que se requiere para calentar y/o fundir una cantidad determinada de metal a una determinada temperatura (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 121

2.17 Calor perdido a través las paredes del horno

El calor perdido por las paredes del horno constituye un problema de vital importancia que afecta el rendimiento de los hornos, las pérdidas de calor se producen por el tipo de funcionamiento del horno y se divide en funcionamiento continuo y discontinuo (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 125

2.17.1 *Funcionamiento continuo*

La temperatura de los productos de combustión es raramente conocida a causa de las dificultades que se presentan en la medida de la temperatura de los gases. Así mismo la temperatura de los productos de combustión excede la temperatura interior de la pared. La temperatura de la cara interior de la pared puede medirse fácilmente y generalmente es conocida. La temperatura de la pared desciende rápidamente al aproximarse a su superficie exterior, donde la temperatura excede ligeramente mayor la temperatura del ambiente. La pérdida de calor a través de una superficie de pared determinada y a una temperatura dada del horno es menor si la pared es de mayor espesor, si está constituida de un material muy aislante o si la superficie externa de la pared es de tal naturaleza que no cede calor con celeridad al medio ambiente (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 126

En la figura 2.28 se observa la gradiente de temperatura durante el flujo de calor continuo a través de la pared de un horno, existiendo igual presión en ambos lados de la cara.

2.17.2 *Funcionamiento intermitente o discontinuo*

La pérdida de calor por las paredes del horno en periodos discontinuos se debe a que los periodos de funcionamiento del horno se alternan con tiempos de parada del mismo.

Cuando el horno se encuentra parado el calor guardado en los refractarios durante el tiempo de funcionamiento de este se dispersa gradualmente, especialmente por convección y radiación

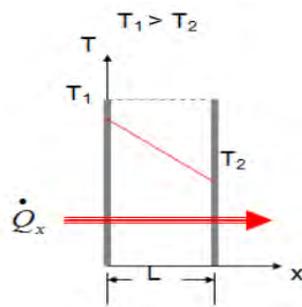
desde la pared exterior. Además, cierta porción de calor es extraída por el aire que circula a través del horno por las aberturas de los quemadores y rendijas de las puertas cerradas incompletamente. La disipación del calor guardado significa una pérdida, debido a que este debe transmitirse mínimamente a los refractarios en el siguiente periodo de funcionamiento (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 142

El cálculo de las pérdidas de calor que se produce por radiación y convección desde la cara fría mientras está parado el horno caliente es posible. Resulta evidente que, cuando existen cortos periodos de funcionamiento y grandes periodos de parada, es preferible utilizar paredes delgadas de refractarios aislantes, porque se almacena en ellos poco calor. La pérdida de calor por disipación del calor almacenado en los refractarios se determina por la relación de tiempo de funcionamiento a tiempo de parada y por la longitud del ciclo (W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon, 1975) pág. 142

En la figura 2.28, observamos la pérdida de calor a través de dos paredes A y C, las mismas que poseen temperaturas distintas, temperatura T_1 de cara interior de la pared A, temperatura exterior T_2 de la pared A o temperatura de la cara interior de la pared C y temperatura T_3 de la cara exterior de la pared C. Así mismo se observa la representación de resistencias de ambas paredes R_A , R_B y R_C el calor perdido se representa por “ q ”.

Figura 2.28

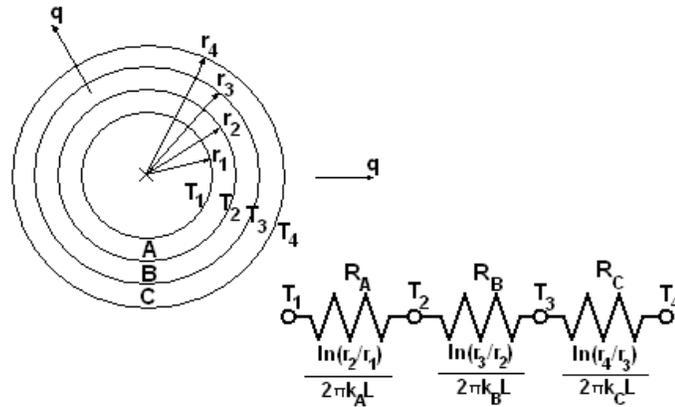
Gradiente de temperatura en un horno



Nota. <https://www.google.com/search?q=repositoriounsaac&oq=&aqs>

Figura 2.29

Representación de un esquema de dos paredes cilíndricas



Nota: Transferencia de calor; J. P. Holman; 1998, pág .20

De la representación de resistencias de las paredes A,B y C de la figura 1.11 se obtiene que la resistencia de la pared A es:

$$R_{ter} = \frac{\ln(r_2/r_1)}{2\pi \cdot k \cdot L} \quad \text{Ecuación 2.22}$$

Para determinar la pérdida de calor mediante las paredes de un horno de crisol, el cual consta de dos paredes (ladrillo refractario y cubierta metálica), apoyándonos en la figura 2.29 y en la ecuación 2.22 obtenemos la ecuación 2.23:

$$Q = \frac{2\pi \cdot L(T_1 - T_4)}{\ln(r_2/r_1)/k_A + \ln(r_3/r_2)/k_B + \ln(r_4/r_3)/k_C} \quad \text{Ecuación 2.23}$$

Donde:

Q : Pérdida calorífica a través de las paredes.

L : Longitud del horno con forma cilíndrica.

KA : Conductividad térmica de la pared de ladrillo refractario.

kB : Conductividad térmica de la pared de cubierta metálica.

T1 :	Temperatura en la cara interna del ladrillo refractario.
T2 :	Temperatura en la cara externa del ladrillo refractario
T3 :	Temperatura en la cara externa de la cubierta metálica.
r1 :	Radio interno de la pared de ladrillo refractario.
r2 :	Radio externo de la pared de ladrillo refractario
r3 :	Radio externo de la pared de cubierta metálica.

2.18 Calor perdido por el escape de gases a través de las puertas.

Las pérdidas de calor que se producen por los gases que salen por la tapa del horno, como se indican en las flechas 5 de la figura 2.27 B, se producen por radiación y convección. Una pequeña pérdida de los gases, que salen al exterior, es menos perjudicial que la oxidación (y enfriamiento) que se produce por la infiltración del aire al interior del horno.

En los hornos con combustible si las puertas están herméticamente cerradas la pérdida no supera el 2% del calor aportado al horno, En caso que la puerta no esté cerrada herméticamente y con los chorros de gases proyectándose contra las mismas, la pérdida puede alcanzar el 8% e incluso superar este valor (Trinks, 1975, p 151).

En hornos discontinuos, si la combustión se ha completado en el interior del horno no existe prácticamente pérdida si los gases escapan por la puerta. Por otro lado, si la combustión no se ha completado, existe una pérdida de calor debido a que estos gases completan su combustión fuera del horno, en lugar de culminar su combustión dentro de él.

En hornos continuos las condiciones son diferentes, si los gases (incluso si la combustión es completa) salen a través de la puerta, se produce una pérdida de calor, debido a que estos mismos gases elevarían la temperatura de la carga y abandonarían el horno a una temperatura más baja (Trinks, 1975, p 152).

2.19 Calor sensible expulsado del horno en los gases de combustión.

Una de las causas de pérdidas de calor, es mediante la eliminación de gases productos de combustión, la cual se indica por la flecha 7 en la figura 2.27 A y C. Estas pérdidas se producen debido a que los productos de combustión retiran energía calorífica del horno al ser expulsados, ya sea en forma potencial, como combustible sin culminar su combustión, o en forma cinética, como calor sensible y calor latente del vapor de agua (Trinks, 1975, p 157).

2.20 Calor perdido por combustión incompleta.

En muchos hornos industriales los combustibles son evacuados sin que se haya realizado la combustión completa. La cantidad de calor perdido por combustión incompleta, no solo depende del tipo de quemadores y horno, sino también de la relación de combustible a aire teórico correcto y que estos estén completamente mezclados (Trinks, 1975, p 170).

CAPITULO III: METODOLOGÍA

3.1 Tipo de investigación

El tipo de investigación es tecnológica, según la clasificación de Piscoya (1987, como se citó en Ñaupas et al., 2018) afirma que “la investigación en tecnología físicas, están orientadas a crear, mejorar, optimizar máquinas, equipos, instrumentos, mecanismos, procedimientos, sistemas en el campo de la tecnología de ingenieros” (p. 139).

De otra parte, la investigación aplicada, a veces llamada investigación técnica, tiende a la resolución de problemas o al desarrollo de ideas, a corto o medio plazo, dirigidas a conseguir innovaciones, mejoras de procesos o productos, incrementos de calidad y productividad. Comprende un conjunto de actividades que tienen por finalidad el descubrir o aplicar conocimientos científicos nuevos, que pueden realizarse en productos y procesos nuevos utilizables (Cegarra Sánchez, 2004)

La investigación tecnológica aplicada al diseño y construcción del horno es práctica, pues los resultados obtenidos son un aporte para la solución de problemas tecnológicos, en este trabajo se encontró soluciones para mejorar el sistema de calentamiento, se optimizó el tiempo de fusión y el consumo de energía.

3.2 Nivel y método de la investigación

El alcance de la investigación es descriptivo y correlacional simple con enfoque cuantitativo, es descriptivo porque especifica las propiedades y características de los elementos que interactúan en el proceso de fusión de aleaciones no ferrosas en hornos de tipo basculante. Es correlacional simple porque permite conocer la asociación entre las variables diseño y construcción del horno, y la obtención eficiente de aleaciones no ferrosas. El método empleado para el desarrollo es hipotético deductivo.

3.3 Diseño de la investigación

El diseño utilizado en la presente investigación es no experimental de carácter transversal correlacional. Se describe y analiza la relación entre las variables en estudio en un período determinado en correspondencia al diseño y construcción del horno, así como la evaluación del proceso de fusión de las aleaciones no ferrosas.

El diseño de investigación tiene el propósito de responder preguntas de investigación y cumplir objetivos de estudio, existen dos tipos no experimental y experimental, el tipo experimental se basa en realizar experimentos con la manipulación intencional de variables (independientes), medición de variables (dependientes), control, validez, y dos o más grupos de comparación. (Hernández, Fernández y Baptista 2018),

Un diseño no experimental es aquel en el que el investigador no manipula las variables independientes, sino que se limita a observarlas tal como ocurren en la realidad. En este tipo de diseño, el investigador no tiene control sobre las variables independientes y no puede establecer relaciones causales entre ellas y las variables dependientes. (Hernández, Fernández y Baptista 2018),

3.4 Metodología de la investigación

La metodología de la investigación para el Diseño y construcción de un horno de aleaciones no ferrosas tuvo los siguientes pasos:

- Identificación del problema
- Revisión de la bibliografía
- Formulación de hipótesis
- Recopilación de datos
- Análisis de datos
- Conclusiones y recomendaciones

3.4.1 *Identificación del problema*

Se definió claramente el problema a investigar, en este caso, la necesidad de diseñar y construir un horno de crisol basculante para la obtención de aleaciones no ferrosas.

3.4.2 *Revisión de la bibliografía*

Se recopiló de forma sistematizada los conocimientos existentes, obtenidos mediante investigación y/o experiencia práctica, esta recopilación incluye libros, tesis y otros y estas están orientadas a establecer nuevos procesos, productos o dispositivos y la mejora sustancial de los ya existentes.

3.4.3 *Formulación de hipótesis*

Se planteó la hipótesis clara y precisa sobre los efectos y resultados de operación y diseño del horno de crisol basculante

3.4.4 *Recopilación de datos*

Se realizó la recopilación de datos necesarios a partir de las pruebas de funcionamiento del horno y se probó la hipótesis planteada.

3.4.5 *Análisis de datos*

Se analizaron los datos recopilados para contrastar la hipótesis planteada.

3.4.6 *Conclusiones y recomendaciones:*

Se elaboró las conclusiones a partir del análisis de los datos de las pruebas de funcionamiento del horno de crisol basculante diseñado. También se dan las recomendaciones de uso para futuras investigaciones en el área de hornos basculantes y obtención de aleaciones no ferrosas.

3.5 Enfoque del diseño

Se entiende por diseño científico técnico la proyección preliminar de una idea tomando en cuenta la realidad y el conocimiento para luego dar paso a la materialización de este en un objeto que busca una solución y resultado partiendo de una interrogante y las especificaciones de diseño.

De manera concreta, el diseño del horno se basó en el estudio de la reacción de la llama sobre la forma de los canales de la pared de la cámara de combustión que es parte importante de la investigación, en el diseño se usó materiales adecuados y parámetros de funcionamiento determinados con cálculos de ingeniería, de estos se determinaron las dimensiones, selecciones materiales, estableció equipos auxiliares, se evaluó el comportamiento del GLP, y realizaron pruebas de funcionamiento.

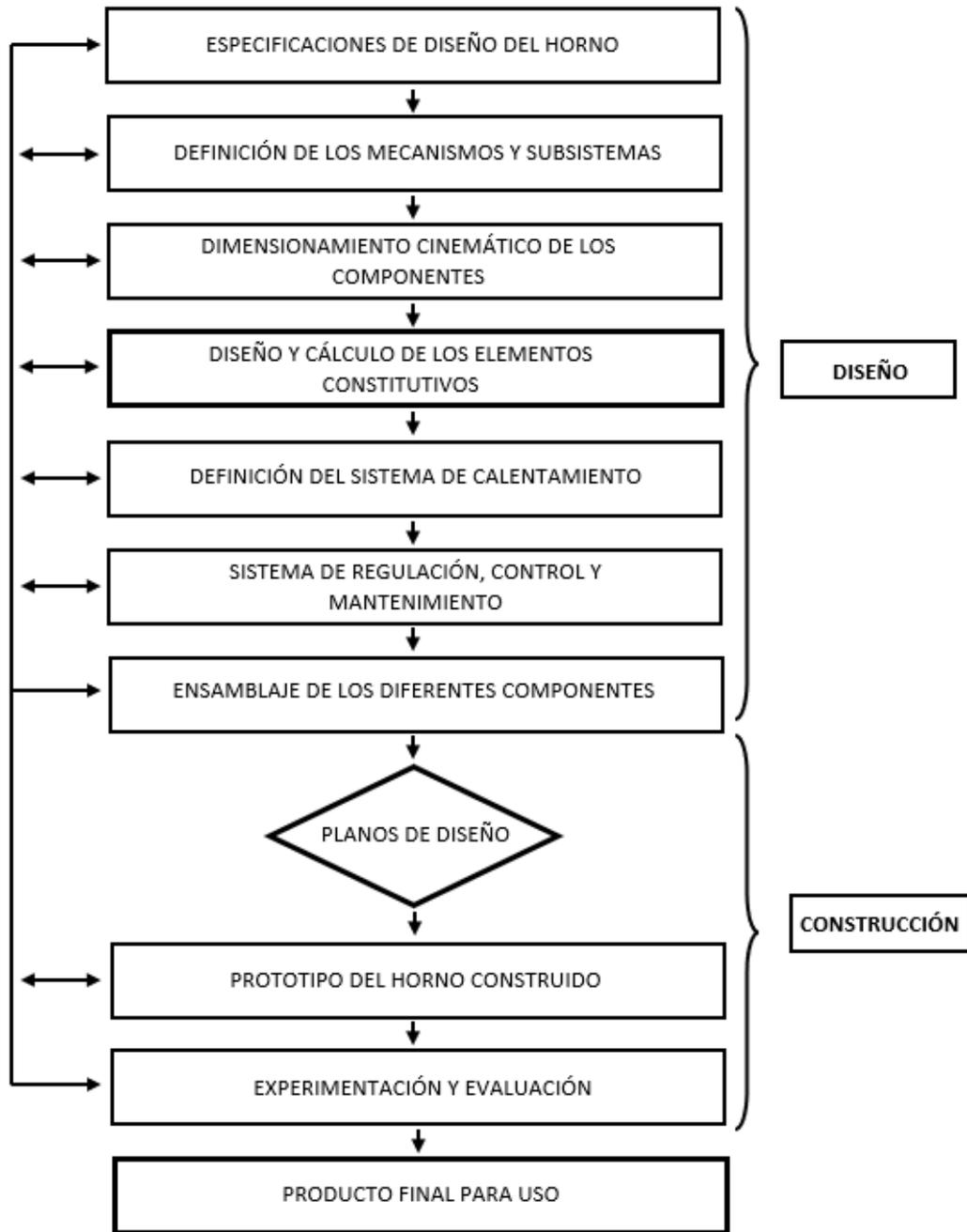
Durante la etapa de experimentación y evaluación del funcionamiento del horno se tomó en cuenta las siguientes consideraciones:

- La altura de la cámara de combustión debe ser mayor al diámetro interior de la cámara en una relación de 1: 1.1 a más
- Las dimensiones del horno se basa a la capacidad del crisol a emplear.
- La relación de crisol con la cámara de combustión debe ser como mínimo de 1 a 1.1 (área del crisol superior : área circular de la cámara de combustión).
- El quemador debe estar ubicado tangencialmente hacia la pared de la cámara.
- El crisol debe tener puntos de apoyo en el borde y base.

En la figura 3.1 se muestra el esquema de las etapas básicas que constituyen el proceso de diseño y construcción del horno basculante como producto final de esta tesis. Se observa que el proceso no es lineal en el cual una o varias de las etapas están sujetos a una retroalimentación.

Figura 3.1

Etapas del proceso de diseño y construcción del horno basculante



Nota. Recopilado y adaptado de Calero, R. (1999). *Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros*.

Tabla 3,1

Matriz de Operacionalización de Variables

Título: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO BASCULANTE PARA LA OBTENCIÓN DE ALEACIONES NO FERROSAS”						
VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDADES	INSTRUMENTO Y/O TÉCNICA
<p>VARIABLE INDEPENDIENTE</p> <p>Diseño y construcción de horno basculante.</p>	<p>El diseño de máquinas es el proceso teórico-práctico que, partiendo del reconocimiento de una necesidad, llega a su satisfacción por medio de la construcción de una máquina. Es un proceso bastante complejo el cual aplica conocimientos de ingeniería, tecnológicos y de otras disciplinas. Para la fabricación y ensamblaje de las piezas de la máquina se deben considerar los tipos de material disponibles, los procesos y equipos de fabricación, recursos humanos especializados, fuentes de energía, aspectos económicos y de marketing (Calero, 1999, pp. 493-506).</p>	<p>Como principales actividades del diseño y construcción del horno, se desarrollaron: especificaciones de diseño, definición de los mecanismos y subsistemas del horno, dimensionamiento cinemático de los componentes, diseño y cálculo de los elementos constitutivos del horno (Selección del material, dimensiones y configuración de las piezas), definición del sistema de calentamiento (Regulación, control y mantenimiento), ensamblaje de los subsistemas, fijación en el bastidor, experimentación y evaluación del desempeño del horno.</p>	Forma.	Sección circular de la cámara de combustión.	cm ²	Cinta métrica y calibrador pie de rey.
			Tamaño.	Volumen de la cámara interior del horno.	cm ³	
			Material.	Tipos de aleaciones metálicas, refractarios y material adicional.	Clase.	Catálogos de proveedores de materiales.
			Sistema de calentamiento.	Tipo de tobera, combustible GLP, ventilador y accesorios del sistema.	Código de elementos componentes.	Manual y textos de diseño de elementos de máquinas.
			Temperatura.	Cantidad de energía calorífica en el sistema de calentamiento del horno y en el proceso de fusión de las aleaciones no ferrosas.	°C	Pirómetro óptico.
<p>VARIABLE DEPENDIENTE</p> <p>Producción de aleaciones no ferrosas</p>	<p>Las aleaciones no ferrosas son aquellas que no contienen hierro como elemento principal el cual sólo puede estar presente en pequeñas cantidades, siendo las más importantes hoy en día: las de aluminio, cobre, zinc, estaño, plomo y magnesio (Díaz Del Castillo, 2015, pp. 156-162).</p> <p>Ciertas aleaciones no ferrosas tienen características ideales para su empleo, como resistencia a la corrosión, y relaciones resistencia-peso, que los hacen competitivos con los aceros en aplicaciones para esfuerzos moderados y altos (Groover, 1997, p. 131)</p>	<p>Determinación de la cantidad o peso de aleación no ferrosa a fundir según la capacidad del crisol, en función al tipo de aleación a fundir y al requerimiento de las dimensiones de las piezas a obtener.</p> <p>Determinación del contenido de los principales elementos químicos en la chatarra de las aleaciones no ferrosas como pistones, cárteres y culatas de motor, aros de llanta, cajas de cambio piezas de máquinas, herramientas y utensilios domésticos.</p>	Cantidad o peso	Capacidad máxima de aleación no ferrosa a fundir (8 kg para el aluminio y 12.5 kg para bronce).	kg	Balanza electrónica digital EXCELL. Mod. Am3 Grondoy. Capacidad:30 kg/5 gr.
			Composición química.	Contenido porcentual de aluminio, cobre, magnesio, zinc, estaño, plomo y silicio.	%	Revisión de catálogos de fabricantes de piezas automotrices, maquinaria, herramientas y utensilios de aluminio.

Nota: Elaboración propia.

CAPITULO IV. DISEÑO DE INGENIERIA Y CONSTRUCCION DEL HORNO

4.1 Diseño del horno

El diseño del horno es una parte fundamental de la investigación, donde nos brindara los requerimientos del diseño, parámetros y variables de funcionamiento. En el diseño y construcción se determina las dimensiones, y se establecen los materiales, combustible, mecanismos del horno y cálculos energéticos para realizar las diferentes pruebas de funcionamiento para evaluar los rendimientos y requerimientos energéticos.

4.2 Propuesta del diseño

Para el presente trabajo de Diseño y Construcción de un Horno de Fundición de Metales no Ferrosos, se tiene necesidad de que el horno tenga características de eficiencia, rendimiento y versatilidad, la propuesta planteada es la diseño y construcción de la cámara de combustión acanalada en un horno de crisol basculante, y teniendo como premisa el conocimiento de que la combustión se define en 3 campos fundamentales de la Ingeniería que son, Cinética Química, Mecánica de Fluidos y Transferencia de Calor

La cinética química que determina la forma en que se desarrolla la combustión como reacción química,

La mecánica de fluidos constituye y determina la forma y características de la llama, en su manejo y control sobre la combustión

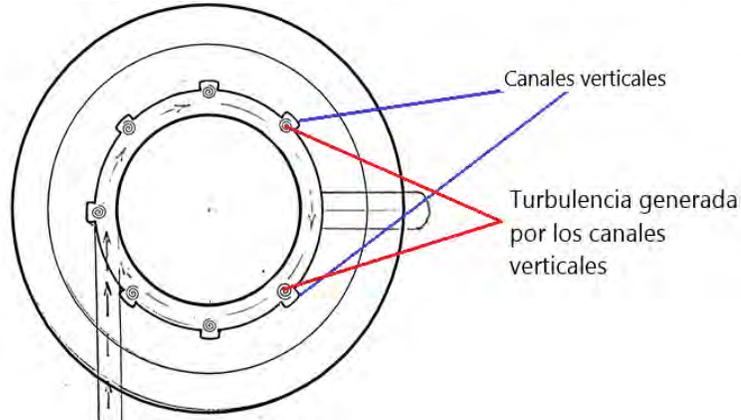
La transferencia de calor que establece las condiciones de aprovechamiento del calor generado.

Nuestra propuesta se apoya en la generación de mayor turbulencia y retención de la llama en los canales de la cámara de combustión durante todo el proceso, logrando que la llama circule

más tiempo en las paredes del crisol, donde las llamas superiores son redireccionadas en la tapa y retornan hacia la carga al interior del crisol y de esta manera se alcance una mayor temperatura en menor tiempo ver figura 4.1

Figura 4.1

Turbulencia generada por efecto de los canales verticales en las paredes vista de planta



Nota. Elaboración propia

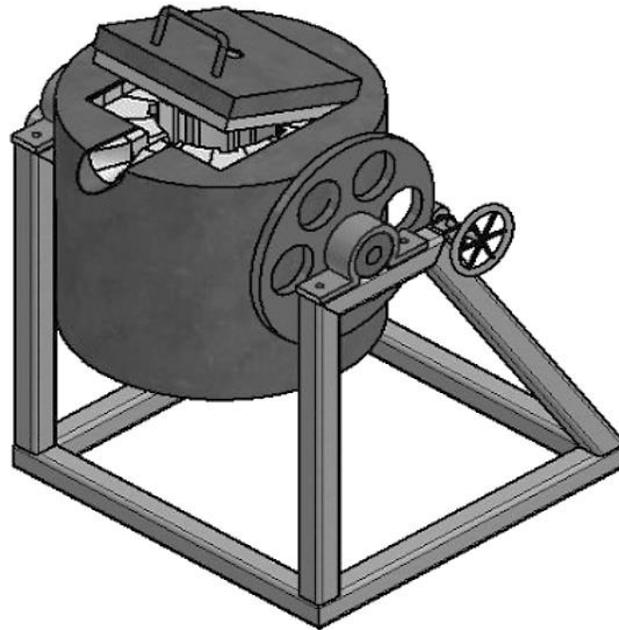
4.3 Descripción de la propuesta

Este horno consta de una cámara de combustión, con la pared cilíndrica interior con canales verticales distribuidos en todo el contorno y alineados con los canales de retorno de la tapa los mismos que reorientan el flujo de las llamas generadas por los canales hacia el interior del crisol. El sistema de basculamiento del horno es para reducir los tiempos de operación de colado y pérdidas de calor.

El diseño de la cámara de combustión con canales verticales en la pared interna es para lograr el flujo turbulento de la llama donde permanezca mayor tiempo posible alrededor del crisol y así aprovechar el poder calorífico generado por la reacción de combustión del GLP. Ver figura 4.2

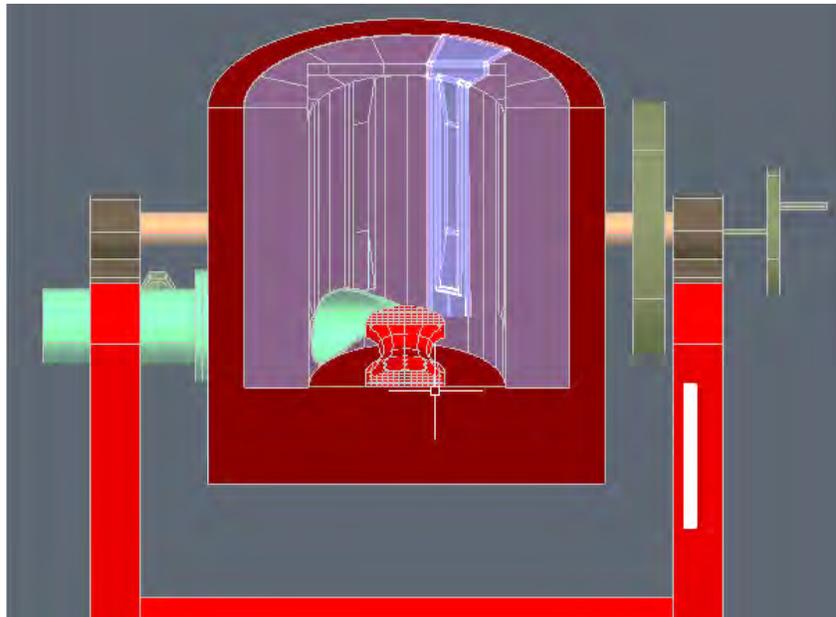
La tapa de retorno reorienta la llama ascendente de los canales verticales dirigiéndolos al interior del crisol produciendo un ataque directo a la carga como se muestra en la figura 4.3

Figura 4.2
Diseño del horno



Nota: Elaboración propia

Figura 4.3
Estructura interna del horno



Nota: Elaboración propia

4.3.1 *Requerimientos del diseño.*

Para diseñar el horno, se debe considerar los siguientes requerimientos que necesita para su funcionamiento adecuado:

- El horno debe ser dimensionado de acuerdo a la capacidad requerida, en este caso del crisol.
- La cámara de combustión debe ser adecuado al volumen del crisol
- La cámara de combustión debe contar con las canales verticales
- La tapa debe contar con los canales de retorno para redireccionamientos de la llama y gases
- La pared del horno debe ser en tres partes, ladrillos refractarios, aislante térmico y plancha metálica
- El quemador debe colocarse en la base de la cámara de combustión por debajo del crisol y su orientación debe ser tangencial a la pared.
- El tipo de combustible GLP
- El horno debe tener un sistema de basculamiento.

4.3.2 *Parámetros de diseño*

Los parámetros pueden cambiar si los resultados no son los esperados. En el horno se identifican los siguientes parámetros.

- Metal a fundir
- Capacidad a fundir
- Crisol a emplear
- Sistema de Basculamiento del horno
- Dimensiones del horno
- Temperatura máxima interior del horno

4.4 Selección de materiales

4.4.1 Crisol

Para seleccionar el crisol se debe tomar en cuenta la cantidad y el tipo de metal a fundir.

El crisol debe cumplir las siguientes características. Ver tabla 4.1

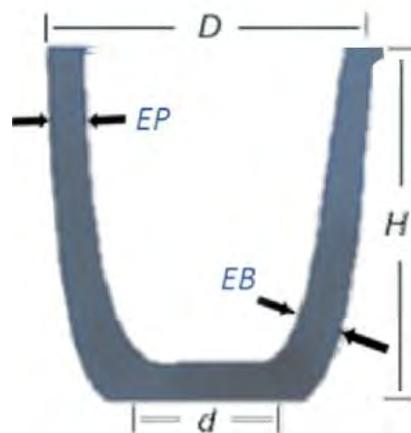
- Buena conductividad térmica
- Resistente al ataque de agentes corrosivos productos de la fundición
- Resistente a choque térmico.
- Capacidad de carga.

Se selecciona el crisol de grafito que resultan ser adecuados para la fundición de aluminio y bronce por ser neutros y no reaccionan con el metal fundido. El crisol de grafito utilizado es el modelo SALAMANDER de A-8 por que cumple con los siguientes requerimientos. Figura 4.4

- Metal a fundir aluminio.
- Temperatura superior a 1200 °C
- Capacidad

Figura 4.4

Medidas del crisol



Nota: Elaboración propia

Tabla 4.1*Formatos y dimensiones de los crisoles*

Modelo	D exterior	Altura H	Base d	Espesor pared EP	Espesor inferior EB
# 1	70	78	46	9	12
# 2	87	108	60	9	13
# 3	102	120	71	10	13
# 5	121	141	83	11	15
# 8	137	169	94	13	17
# 10	148	186	100	14	18
# 12	156	192	107	14	19
# 16	164	212	111	17	19

*Nota: www.roacsa.com.pe.***4.4.2 Ladrillo refractario**

El ladrillo refractario se usa con el fin de reducir las pérdidas de calor máximas que se pueden presentar. En la elaboración del horno se emplearon ladrillos refractarios, los cuales poseen de un alto contenido de alúmina, aproximadamente del 70% Al_2O_3 , los cuales los hacen aún más resistentes que los ladrillos normales de arcilla, además sus cualidades varían en función a la cantidad de alúmina. Estos tienen una gran resistencia a la desintegración, producto de los cambios bruscos de temperatura, y poseen una gran resistencia mecánica y constancia de volumen a altas temperaturas de trabajo. Los ladrillos con 60% o más de Al_2O_3 son muy resistentes a determinadas reacciones corrosivas, incluso por la reacción de las cenizas de combustibles, carbón, petróleo y escorias básicas (Castillo P. , 2011). Ver tabla 4.2

Tabla 4.2

Características del ladrillo refractario empleado en la construcción del horno

Clase	Marca	Temperatura de trabajo	Usos y aplicaciones
70% Al ₂ O ₃	Repsa Alusite	1750°C	Hornos rotatorios de cal y cemento, calderos, hornos metalúrgicos.

Nota: www.repsa.com.pe/ladrillosrefractarios/altocontenidoalumina.htm

4.4.3 Concreto refractario

El concreto refractario son las mezclas de diferentes materiales refractarios molidos, con una precisa granulometría y los aditivos ligantes. El diseño presentado actual sirve para llenar los espacios entre ladrillo y ladrillo, el cual no tendrá contacto directo con el calor por la combustión, puesto que las características más principales son:

- Gran resistencia ante las grandes temperaturas, y a la disminución de las mismas.
- Alta resistencia a la desintegración por los choques térmicos a altas temperaturas.
- Muy bajo nivel en el coeficiente de expansión térmica.

Cuando ya se encuentra homogeneizada la cantidad de concreto, se procede a mezclarlo en seco, ya sea a mano o en mezcladora mecánica, luego se adiciona la cantidad indicada de agua y se continúa la mezcla durante 5 a 10 minutos aproximadamente. (Castillo P. , 2011).

4.4.4 Estructura metálica

La estructura metálica del horno está diseñada en base de perfiles de acero que en su mayoría debe tener disponible el mercado, a esta estructura se unirá los diferentes medios como chapa metálica y sus soportes. Ver figura 4.5 Los perfiles de acero deben soportar además de su propio peso, los siguientes elementos; ladrillo refractario, concreto refractario, aislantes y crisol, conteniendo el metal fundido. Los anteriores pesos involucran la presencia de fuerzas, que se transmitirán a través de los diferentes mecanismos hasta los soportes base del horno. Tabla 4.4

El objetivo principal de las placas de acero, constituye en formar una estructura de soporte para sostener y proteger la parte interna. Se tomó en cuenta el requerimiento de diseño para la estructura del horno se utilizó lo siguiente: tabla 4.3

Tabla 4.3

Características de materiales metálicos seleccionados.

Material	Dimensiones
- Plancha estriada A-36	2.7 mm, de espesor.
- Tubo redondo	2" LAC de 2 mm.
- Tubo cuadrado	35 mm LAC de 2 mm.
- Platina	1" x 3mm
- Eje de liso	1"
- Chumaceras con rodamientos.	1"
- Rueda dentada.	40cm diámetro

Nota: Elaboración propia

Tabla 4.4

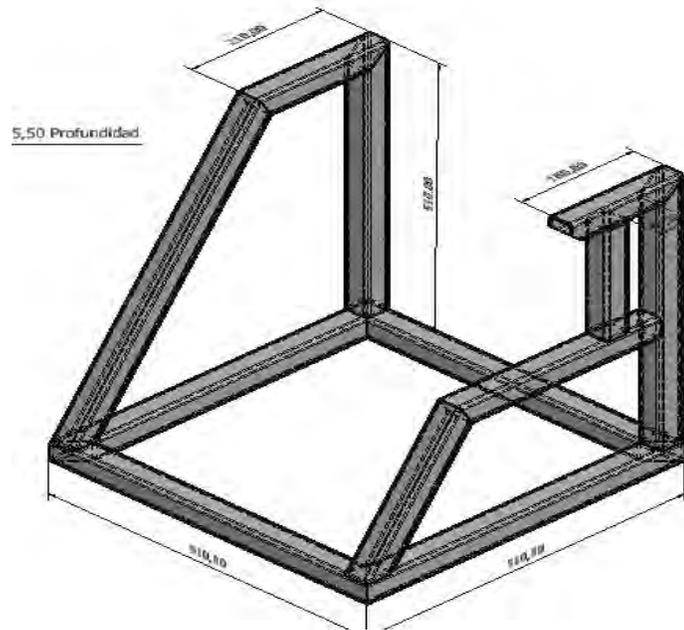
Propiedades mecánicas del acero A-36

Calidad	Norma	Limite de fluencia (Mpa) Kg/mm²	Resistencia a la tracción (Mpa) Kg/mm²	Alargamiento en 200 mm (%)	Doblado a 180°
Estructural	ASTM 36	250 min (25.50 min)	400 -500 (40.80 -56.10)	20 min	Sin fisura

Nota. Recuperado de "www.Aceros Arequipa .COM

Figura 4.5

Esquema de bastidor de (estructura metálica)



Nota: elaboración propia.

4.4.5 Quemador

Es necesario conocer los valores y cantidades del combustible para el quemador tomando en cuenta las necesidades de operación, vemos por conveniente optar por un quemador de las siguientes características:

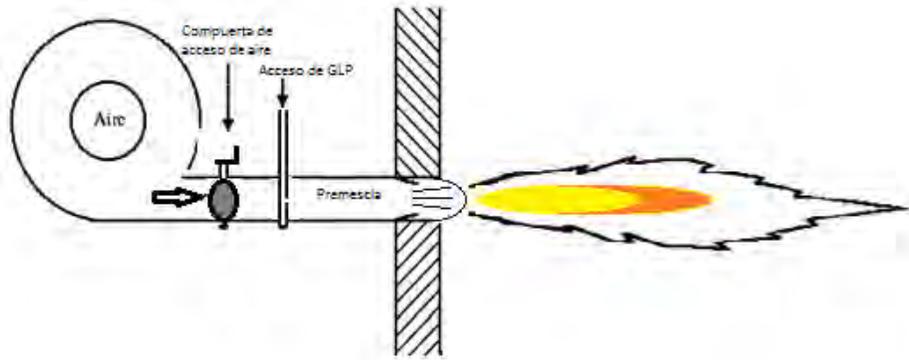
- Primero:** La relación Aire-Combustible de pre mezcla.
- Segundo:** La llama debe ingresar a la cámara de combustión rápidamente.
- Tercero:** Debe producir una llama adecuada y constante.

Debido a que el horno va llegar a altas temperaturas, en la parte posterior del quemador se encuentra el ventilador, lo cual proporcionara el aire de exceso necesario para la combustión, posee una válvula para controlar el ingreso de gas, y una compuerta que regula el ingreso de aire. Figura

4.6

Figura 4.6

Esquema del quemador usado en el horno de crisol con GLP



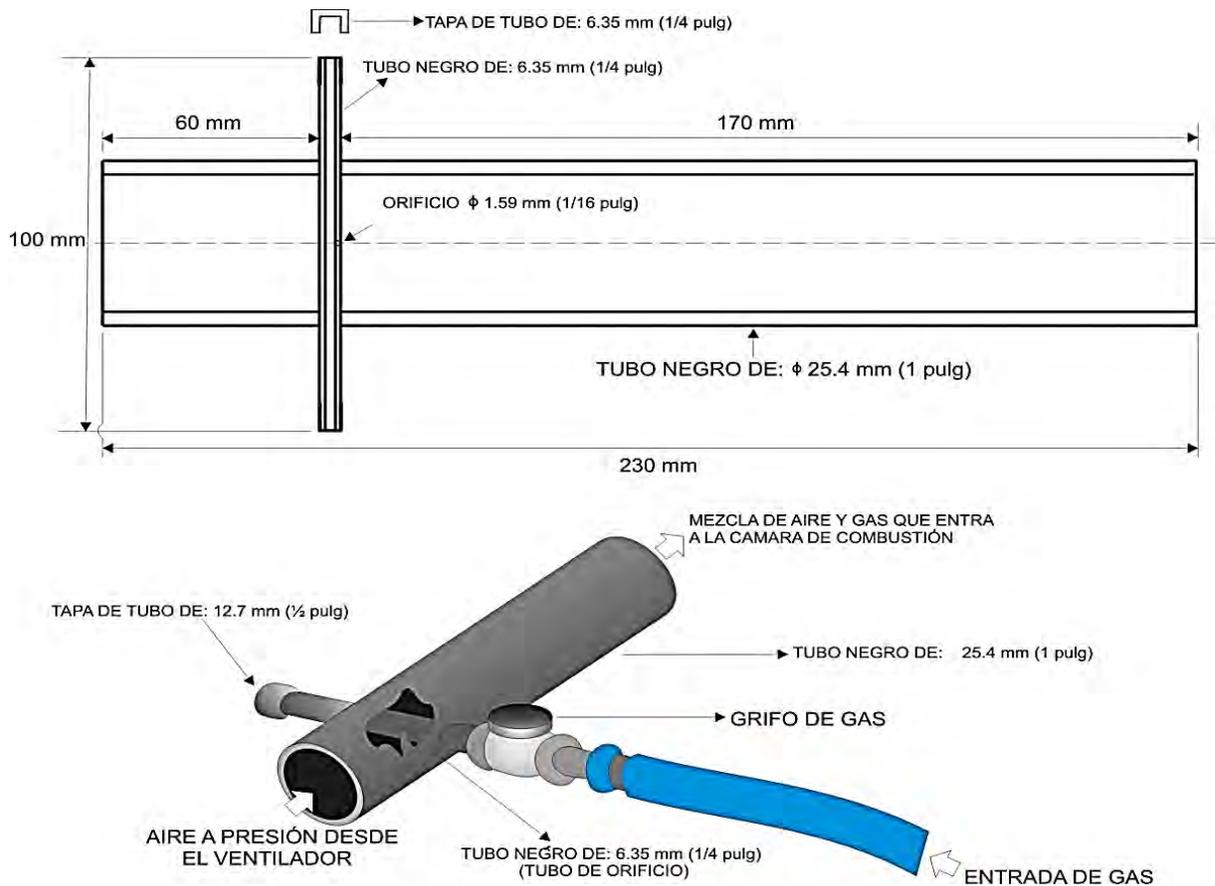
Nota: Elaboración propia.

El quemador consta de una precámara para la premezcla de aire y combustible, El tamaño del quemador es acorde al tamaño del horno, como se muestra en la figura 4.6. El tubo para que inyecte el gas, es un niple de 100mm de largo, hecho de tubo negro de 6.35mm (1/4pulg) de diámetro. Perfore un agujero de 1.59mm (1/16pulg) a través del centro de una de las paredes.

La tobera se hace con un pedazo de tubo negro de 1 1/2 pulg) de diámetro y con un largo de 230 mm dotado de dos agujeros para dar cabida al tubo de orificio. Estos agujeros se perforan atravesando el tubo en su sección a una distancia de 170mm de uno de los extremos suelde el tubo del orificio en su lugar (soldadura oxiacetilénica) recomendable con bronce, de manera que el orificio dé en dirección al horno, uno de sus extremos se sella y el otro va instalado la toma de GLP. En uno de los extremos de la tobera se instala una compuerta con una planchuela redonda que cubra casi de forma exacta el interior de la tobera para graduar el flujo de aire suministrado para la combustión, a continuación, se instala la turbina de aire. Figura 4.7

Figura 4.7

Diseño del Quemador para GLP.



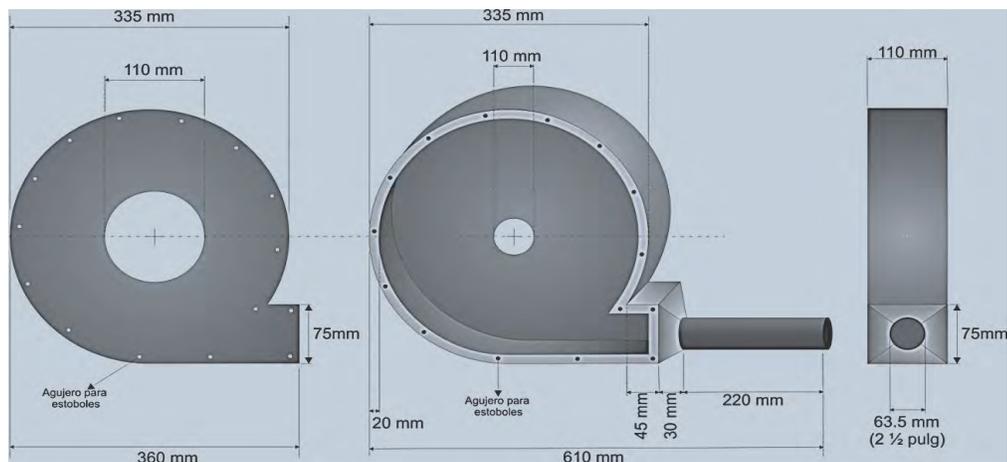
Nota: elaboración propia.

4.4.6 Ventilador

El suministro de aire para la combustión del GLP en el horno se realiza utilizando un ventilador centrífugo de paletas radiales, con diámetro de suministro de aire de 2 pulgadas, y con un motor eléctrico de 0.5 HP de potencia. Cabe señalar que el ventilador proporciona aire necesario para la combustión, para darle la longitud y dirección a la llama, de tal manera se produzca el efecto centrífugo logrando que la llama siga el contorno de la pared refractaria adyacente, y de este modo mejorar su distribución por las paredes. Figura 4.8

Figura 4.7

Esquema del quemador usado en el horno de crisol con GLP



Fuente: elaboración propia.

4.4.7 Selección combustible

Desde el punto de vista medio ambiental el mejor combustible (el que se genera la menor cantidad de gases contaminantes al medio ambiente por ser un combustible donde el proceso de combustión se lleva a cabo de forma casi completa es el GLP) y para nosotros que posea la capacidad o poder calífico necesario para el trabajo y la versatilidad de ser transportado fácilmente el gas licuado de petróleo **GLP** es la opción para ser utilizada. Tabla 4.5

Tabla 4.5

Propiedades del propano y butano

Características	Propano (C3H8) (70%)	Butano (C4H10) (30%)
Densidad del gas.	0.25	0.27
Densidad del líquido.	0.3	0.29
Peso de un l en kg.	0.50	0.56
1m ³ de aire para quemar	24	30
Poder calorífica kcal/l	6100	6800
Poder calorífica kcal/kg	11900	11800

Nota. Tomado de gas natural propiedades y uso. (pág 50), por J. H. Viloche,2019

Figura 4.8

Balón de GLP existente el mercado para el horno de crisol



Nota: www.peru.combustibles.com

Nota: 1 kg GLP \longrightarrow 1.77 Lt GLP

X kg GLP \longrightarrow 1 Lt GLP

X = 0.565 kg GLP

4.5 Dimensionamiento del horno

Se decide seleccionar la capacidad del crisol, para conocer sus características y a partir de estas iniciar el diseño del horno

Tabla 4.6

Dimensionamiento del horno

Características	Material del crisol	Altura h (cm)	D _{sup} (cm)	D _{inf} (cm)	Masa de crisol (kg)
	Grafito	18.4	15.6	10.8	1.8

Nota: elaboración propia

Para el dimensionamiento del horno se debe tener en cuenta el cálculo del área de circular de la cámara de combustión.

Cálculo del área de la cámara de combustión

Para el cálculo tomamos en cuenta la relación del crisol con la cámara de combustión de la bibliografía revisada de (Castillo P. , 2015).

donde se aclara que esta relación debe ser como mínimo 1:1.1 pero para el horno propuesto utilizaremos la relación 1:1.17

$$a_{efectiva\ comb} = (a_{cir\ sup\ cri} \times rel_{cri/cam}) - a_{cir\ sup\ cri}$$

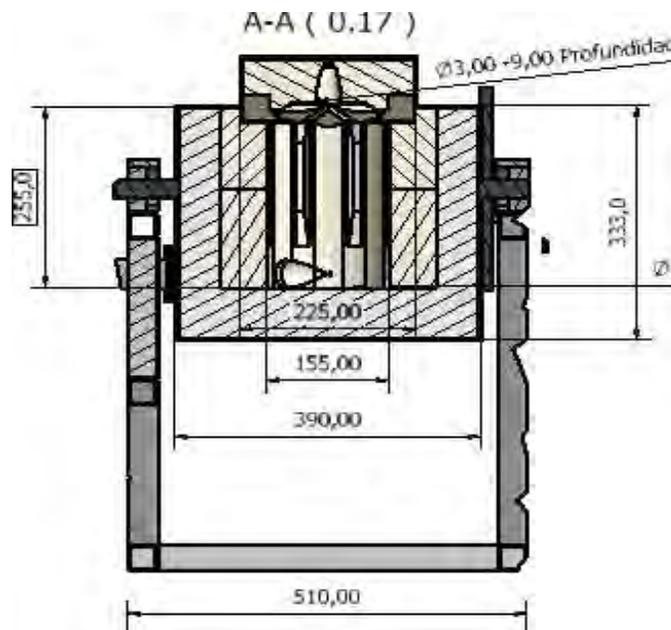
donde:

$a_{efectiva\ comb} =$	área efectiva de combustión =	30.04cm ²
$a_{cir\ sup\ cri} =$	área circular superior del crisol =	176.714 cm ²
$rel_{cri/cam} =$	relación crisol/cámara = 1: 1.17=	206.76
$a_{efectiva\ comb} =$	$(176.714 \times 1.17) - 176.714 =$	$30.04\ cm^2 = 0.3004m^2$

Para el diseño del horno se tomaron los mismos procedimientos de diseño convencional de hornos de crisol, y se dotará un nuevo diseño de la cámara de combustión sin afectar los parámetros de diseño utilizados. Se tomará el área circular de la cámara con el que se generará un nuevo diseño de la forma con cavidades en su contorno, como se muestra en la figura 4.10

Figura 4.9

Diseño y dimensionamiento del horno.



Nota Elaboración propia.

4.6 Cálculo de la cámara de combustión.

Habiendo realizado el estudio e investigación del funcionamiento de diferentes hornos de fundición se del diseño de la cámara de combustión, esperando mejorar la eficiencia y rendimiento de la misma. realizó la propuesta

4.6.1 *Volumen físico de la cámara de combustión*

Es el volumen físico de la cámara, corresponde al volumen encerrado entre las paredes del horno y el crisol, se determina el volumen físico a partir de la fórmula y se expresa de la siguiente manera.

$$V_{\text{fis. cámara}} = (V_{\text{cam horno}} + V_{\text{can turb}}) - (V_{\text{crisol}} + V_{\text{tor}})$$

Dónde:

$$V_{\text{Fis}\cdot\text{Cámara}} = \text{Volumen físico de la cámara. (m}^3\text{)}$$

$$V_{\text{Cam}\cdot\text{Horno}} = \text{Volumen de la cámara interior del horno. (m}^3\text{)}$$

$$V_{\text{can. turb.}} = \text{Volumen canales de turbulencia. (m}^3\text{)}$$

$$V_{\text{Crisol}} = \text{Volumen del crisol. (m}^3\text{)}$$

$$V_{\text{tor.}} = \text{Volumen torreta}$$

4.6.2 *Volumen de la cámara interior del horno.*

Se realizará una aproximación del espacio interior del horno para obtener las medidas del horno.

$$\text{Diámetro} = 15.5 \text{ cm ó } 0.155 \text{ m}$$

$$\text{Altura} = 22 \text{ cm ó } 0.22 \text{ m}$$

El espacio entre el crisol y las paredes de la cámara de horno varían con respecto a la altura del mismo, y el crisol este elevado 5 cm. de la solera del mismo.

$$V \text{ cam horno} = a * h$$

Donde:

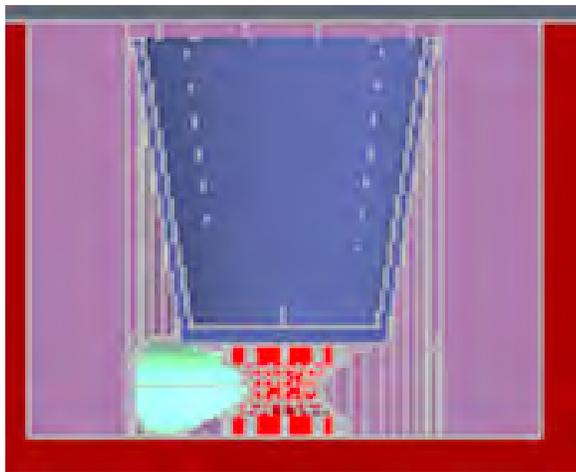
$$a = \text{área de la base de la cámara} = 191.135 \text{ cm}^2$$

$$h = \text{altura de la cámara del horno.} = 22 \text{ cm}$$

$$V \text{ cam horno} = 191.135 * 22 = \mathbf{4204.97 \text{ cm}^3}$$

Figura 4.10

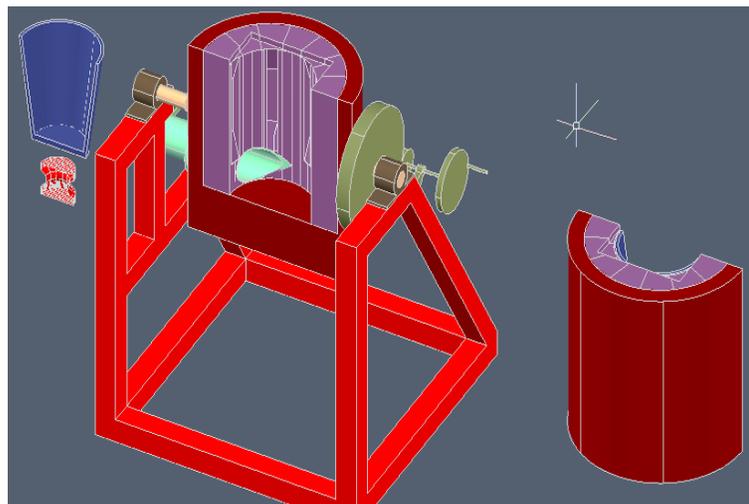
Dimensionamiento de la cámara y crisol



Nota: elaboración propia

Figura 4.11

Dimensionamiento de la cámara y crisol



Nota: elaboración propia

Hallando volumen del crisol

$$V_{\text{crisol}} = \pi L_c \left(\frac{D_c^2 + d_c^2 + D_c \cdot d_c}{12} \right)$$

Dónde: D_c = Diámetro mayor del crisol (m)

d_c = Diámetro menor del crisol (m)

L_c = Longitud del crisol (m)

Con los datos del crisol se tiene:

$$D_c = 15 \text{ cm} \quad L_c = 17.5 \text{ cm} \quad d_c = 11 \text{ cm}$$

$$V_{\text{crisol}} = \pi L_c \left(\frac{D_c^2 + d_c^2 + D_c \cdot d_c}{12} \right) = 1232.421 \text{ cm}^3 \hat{=} 0.001232 \text{ m}^3$$

Volumen de los canales de turbulencia.

$$V_{\text{can turb}} = V_{\text{sup}} + V_{\text{canal recto}} + V_{\text{inf}} = 1.5 \text{ cm}^3 + 30 \text{ cm}^3 + 7.5 \text{ cm}^3 = 39 \text{ cm}^3$$

$$V_{\text{can turb}} * 6 \text{ canales} = 234 \text{ cm}^3 \hat{=} 0.000234 \text{ m}^3$$

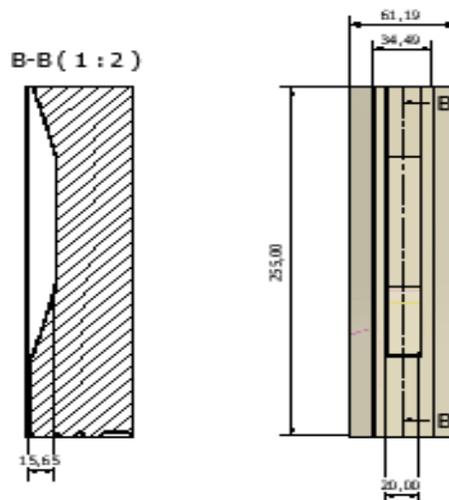
Volumen de canal tapa.

Con los valores calculados se tiene:

$$V_{\text{can tapa}} = 48 \text{ cm}^3$$

Figura 4.12

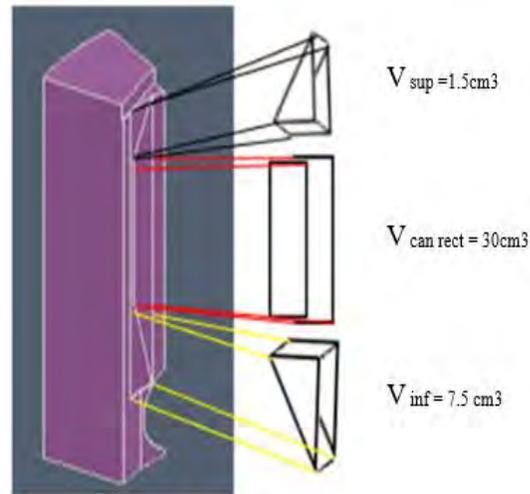
Volumen de canales verticales



Nota: elaboración propia

Figura 4.13

Volumen de los canales de turbulencia



Nota: elaboración propia

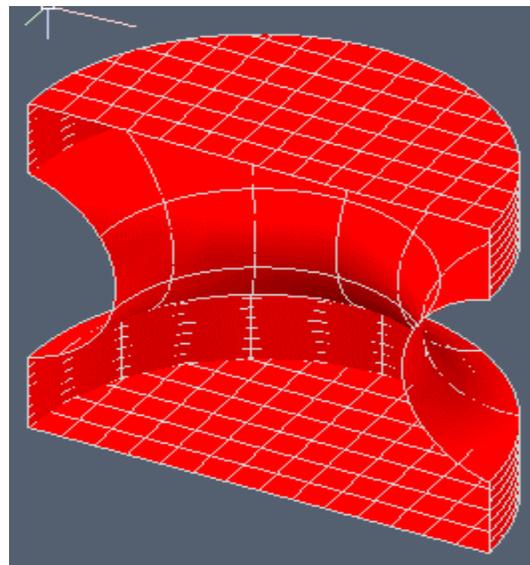
Volumen de la torreta.

Con los valores calculados se tiene:

$$V_{tor} = 34.03 \text{ cm}^3$$

Figura 4.14

Volumen de torreta



Nota: elaboración propia

Calculo total del volumen físico

$$V_{fis. camara} = (V_{cam\ hornos} + V_{can\ turb} + V_{can\ tapa}) - (V_{crisol} + V_{tor})$$

$$V_{fis. camara} = (4204.97 + 234 + 48) - (1232.421 + 34.03)$$

$$V_{fis. camara} = 3220.519\text{ cm}^3 \text{ ó } 0.003220\text{ m}^3$$

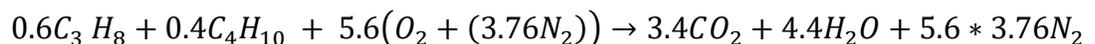
4.6.3 Cálculos de combustión

Aire teórico – coeficiente de exceso de aire

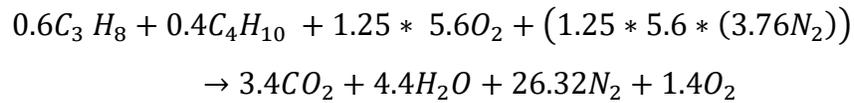
La cantidad mínima de aire necesaria para oxidar los reactivos se conoce con el nombre de aire teórico. Cuando la combustión se lleva a cabo con el aire teórico esta debe ocurrir íntegramente, en la práctica esto resulta imposible. Se necesita más oxígeno del teóricamente necesario para lograr la combustión u oxidación total de los reactivos, se requiere entonces un exceso de aire, pues cada porción de combustible por ejemplo una gota debe hallarse estrictamente rodeada por un número de moléculas de oxígeno mayor que el necesario para asegurar la oxidación de todas las moléculas del hidrocarburo. Este exceso de aire generalmente se expresa como un porcentaje del aire teórico y se denomina **coeficiente de exceso de aire**. En este caso se va a tomar un valor medio del exceso de aire de 25%, porque las condiciones ambientales de donde se va a instalar el equipo así lo requieren, la combustión del GLP (según información del Ministerio de Energía y Minas contiene 60% de butano y 40% de propano) en presencia de 100% de aire se tiene: (Metrogas, 2017)



∴



Con un exceso de aire del 25 % es decir 125% de aire obtendremos:



Análisis volumétrico de los productos de la combustión.

Siendo el número total de moles de los productos de la combustión:

$$n_t = n_{CO_2} + n_{H_2O} + n_{N_2} + n_{O_2}$$

$$n_t = 3.4 + 4.4 + 26.32 + 1.4 = 35.52 \text{ moles}$$

El análisis volumétrico de los productos de la combustión es:

$$y_t = \frac{n_i}{n_t} = \frac{P_i}{P_t} \Rightarrow y_{CO_2} = \frac{3.4}{35.52} = 0.096$$

$$y_{N_2} = \frac{26.32}{35.52} = 0.741$$

$$y_{O_2} = \frac{1.4}{35.52} = 0.039$$

$$y_{H_2O} = \frac{4.4}{35.52} = 0.124$$

Relación aire-combustible.

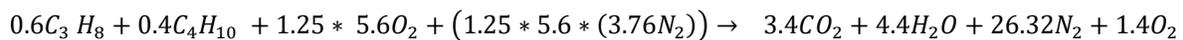
$$r_{\frac{a}{c}} = \frac{n_{aire}}{n_{comb}} \qquad r_{\frac{a}{c}} = \frac{n_{aire} * M_{aire}}{n_{comb} * M_{comb}}$$

Donde:

n = número de moles.

M = masa molar en kg. / kg. Mol

En base molar



$$r_{\frac{a}{c}} = \frac{1.4+26.32}{0.6+0.4} = 27.72 \text{ moles } \frac{a}{c}$$

$$r_{\frac{c}{a}} = \frac{1}{27.72} = 0.0360 \text{ moles } \frac{c}{a}$$

En Base De Masa

Propano C_3H_8 $M = 44.097 \text{ kg. / kg. mol}$

Butano C_4H_{10} $M = 58.127 \text{ kg. / kg. mol}$

Aire $M = 28.93 \text{ Kg. / kg. mol}$

$$r_{\frac{a}{c}} = \frac{27.72 \cdot 28.93}{(0.6 \cdot 44.097) + (0.4 \cdot 58.127)} = \frac{801.94}{26.46 + 23.25} = 16.13 \frac{\text{kg}_{\text{aire}}}{\text{kg}_{\text{comb}}}$$

Ósea se necesita 16.13 kg de aire por 1 kg de combustible, la relación de aire combustible es de 16.13 á 1 y la relación combustible aire es de 0.0620 kg combustible para kg de aire

4.6.4 Balance de materia y energia

Balance de materia

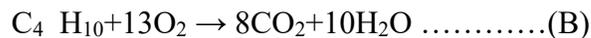
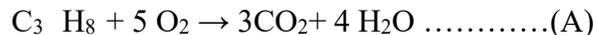
Se tomará como dato lo siguiente:

Combustible GLP= 1000gr = 1.77 L

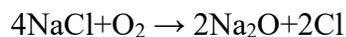
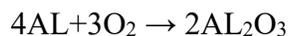
Propano $C_3H_8 = 60\% \rightarrow 600\text{gr}$

Butano $C_4H_{10} = 40\% \rightarrow 400\text{gr}$

➤ **Reacción completa del GLP.**



➤ **Reacción del aluminio y el cloruro de sodio como escorificante.**



➤ **El O2 requerido para que ocurra la reacción**

$$600\text{gr } C_3H_8 * \frac{5(32\text{gr}O_2)}{44\text{gr}C_3H_8} = 2181.818\text{gr}O_2$$

$$400\text{gr } C_4H_{10} * \frac{13(32\text{gr}O_2)}{2(58\text{gr}C_4H_{10})} = 1434.483\text{gr}O_2$$

Sub total de O_2 requerido para la combustión = **3616.301 gr O_2**

➤ **Considerando que la combustión necesita 25% de exceso de O_2 se tiene:**

$$3616.301\text{gr } O_2 * 0.25 = 904.075\text{gr } O_2 \text{ de exceso}$$

$$\begin{aligned} \text{Total } O_2 &= 3616.301\text{gr } O_2 + 904.075\text{gr } O_2 \text{ exceso} \\ &= \mathbf{4520.376\text{gr } O_2 \text{ ó } 4.520\text{kg } O_2} \end{aligned}$$

➤ **Hallando aire seco**

El porcentaje en peso de O_2 y N_2 en el aire es el siguiente:

$$O_2 : 21\%$$

$$N_2 : 78.4 \%$$

El contenido de N_2 en el aire es:

$$4520.376\text{gr } O_2 * \frac{78.4 N_2}{21 O_2} = 16876.070\text{gr}N_2$$

$$4520.376\text{gr } O_2 + 16876.070\text{gr } N_2 = \mathbf{21396.446\text{gr aire seco}}$$

➤ **Cantidades de los Gases que se generan en la combustión**

De la reacción del propano

$$CO_2: 600\text{gr } C_3H_8 * \frac{3(44\text{gr}CO_2)}{44\text{gr } C_3H_8} = \mathbf{1800\text{gr } CO_2}$$

$$\text{Vapor de } H_2O: 600\text{gr } C_3H_8 * \frac{4(18\text{gr}H_2O)}{44\text{gr } C_3H_8} = \mathbf{981.818\text{gr } H_2O}$$

De la reacción del butano

$$CO_2: 400\text{gr } C_4H_{10} * \frac{8(44\text{gr}CO_2)}{2(58\text{gr } C_4H_{10})} = \mathbf{1213.793\text{gr } CO_2}$$

$$\text{Vapor de H}_2\text{O: } 400\text{gr C}_4\text{H}_{10} * \frac{10(18\text{grH}_2\text{O})}{2(58\text{gr C}_4\text{H}_{10})} = \mathbf{620.690\text{gr H}_2\text{O}}$$

$$\text{Total CO}_2 = 3013.793\text{gr} = \mathbf{3.013\text{kg}}$$

$$\text{Total H}_2\text{O} = 1602.508\text{gr} = \mathbf{1.602\text{kg}}$$

En la ciudad del Cusco las condiciones atmosféricas y ambientales son las siguientes

-Presión atmosférica:	512mm Hg
-Porcentaje de humedad:	60%
-Temperatura media del ambiente:	12.5°C
-Presión de agua a 12°C:	10.500mm Hg

Entonces la presión de agua a 12 °C y con porcentaje de humedad de 60 % es:

$$10.500\text{mm Hg} * 0.6 = 6.300\text{mm Hg}$$

La presión del aire seco es:

$$512\text{mm Hg} - 6.300\text{mmHg} = 505.700\text{mm Hg}$$

La cantidad de vapor de agua que entra en la reacción es:

$$\frac{6300\text{mmHg} * 21396.446\text{gr de aire seco}}{512\text{mmHg Presion atmosferica}}$$

$$= \mathbf{263.277\text{gr de vapor de H}_2\text{O en el aire}}$$

Tabla 4.7

Balance de materia

Entrada	Salida
Peso material	Tocho de Al
Peso NaCl	Cl
	Na ₂ O
	Escorias =
O ₂ requerido = 3616.301gr	CO ₂ = 3013.793gr
O ₂ exceso = 904.075gr	O ₂ exceso = 904.075gr
GLP = 1000gr	
N ₂ = 16876.070gr	N ₂ = 16876.070gr
Vapor H ₂ O = 263.277gr	Vapor H ₂ O = 263.277gr + 1602.508gr
Total = 22659.723gr	Total = 22659.723gr

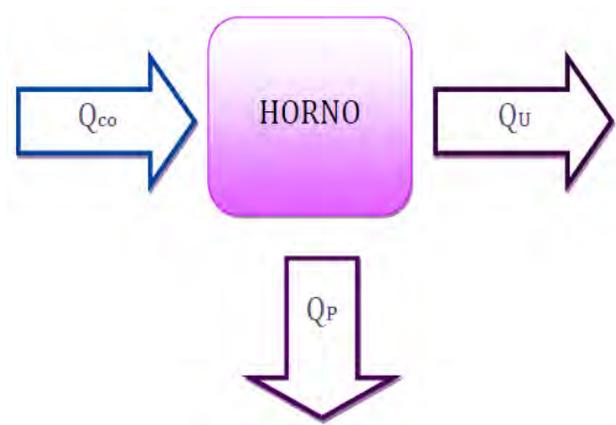
Nota: Elaboración propia

Balance de energía

De acuerdo a la ley de la conservación de la energía el calor liberado por el combustible es equivalente a la suma del proceso de calentamiento, más las pérdidas de calor en el horno (Agencia Chilena de Eficiencia Energética, 2018)

Figura 4.15

Balance de energía del horno



Nota: Elaboración propia

$$Q_{Co} = Q_U + Q_{P\ total}$$

Donde:

Q_{Co} = Calor liberado por el combustible (Kcal/h)

Q_U = Calor útil para la fusión (Kcal/h)

Q_P = Calor total perdido en el horno (Kcal/h)

|Cálculo Del Calor Útil para la fusión.

Para obtener el calor útil tomaremos:

$$Q_U = Q_{carga\ metal} + Q_{absor\ crisol}$$

Donde:

Q_U = Calor útil para la fusión Kcal/h.

$Q_{carga\ metal}$ = Calor que se entrega a la carga metálica

$Q_{absor\ crisol}$ = Calor que es absorbido por el crisol

Calor que ha de entregarse a la carga metálica

$$Q_{carga\ metalica} = Q_1 + Q_2 + Q_3$$

En este caso se debe tomar en cuenta lo siguiente:

Sabe que el calor debe ser mayor a 13 °C temperatura ambiente, hasta los 658.7 °C temperatura de fusión del Aluminio.

Se recomienda que la temperatura del metal fundido para que pueda estar en condiciones óptimas de colado y ser puesto en moldes adecuadamente sea superior a la temperatura de fusión en aprox. 20% para el aluminio, este será otro dato que se incluye para encontrar la cantidad de calor que se necesita para el garantizar la fluidez durante el proceso de colado de la carga metálica. Entonces se tiene reemplazando en la ecuación.

$$Q_1 = \frac{m \cdot c_p \cdot (t_f - t_o)}{t}$$

DONDE:

- Q_T = Calor necesario para elevar la temperatura de 13 °C a 658.7 °C
 m = masa de la carga 5 Kg
 C_p = Calor específico Al 0,22 Kcal/Kg°C
 T_f = Temperatura de fusión 658.7 °C
 T_o = Temperatura ambiente 13 °C
 t = Tiempo de fusión 0,36 h = 21.6 min



$$Q_1 = \frac{5 \cdot 0.22 \cdot (658.7 - 13)}{0.36 \text{ h}} = 1272.972 \text{ kcal/h} \text{ } \hat{=} \text{ } 1485.382 \text{ W}$$

$$Q_2 = \frac{m \cdot \lambda}{t}$$

Donde:

- Q_2 = Cantidad de calor necesario para producir un cambio de fase
 m = masa de la carga 5 kg
 λ = Calor latente del Aluminio 94.16 Kcal/Kg
 t = Tiempo de fusión 0,36 h

$$Q_2 = \frac{5 \cdot 94.16}{0.36 \text{ h}}$$

$$Q_2 = 1307.778 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \text{ } \hat{=} \text{ } 1525.995 \text{ W}$$

$$Q_3 = \frac{m \cdot c_p \cdot (T_f - T_o)}{t}$$

- Q_3 = Calor necesario para llegar a la temperatura de colado

Donde:

- m = masa de la carga 5 Kg
 C_p = Calor específico del Al 0,22 Kcal/Kg°C
 T_f = Temperatura de colado 800 °C
 T_o = Temperatura de fusión 658.7 °C
 Tiempo de fusión = 0,36 h

$$Q_3 = \frac{5 \cdot 0.22 \cdot (800 - 658.7)}{0.36} = 431.75 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \text{ ó } 503.792 \text{ W}$$

Es por ello que la cantidad de calor total que se va requerir sería igual a la sumatoria de calores individuales de los resultados anteriores.

$$Q_{\text{carga metal}} = 1272.972 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 1307.778 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 431.75 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 3012.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \text{ ó } 3515.169 \text{ W}$$

Calor absorbido por el crisol.

Es importante calcular el calor absorbido por el crisol durante el funcionamiento, para lo cual se decidió seleccionar un crisol de grafito. Por consiguiente, el calor absorbido por el crisol se calculará de la siguiente manera

$$Q_{\text{absor crisol}} = \frac{m \cdot cp \cdot (t_f - t_o)}{t}$$

Donde:

$Q_{\text{absor crisol}}$	=	Calor absorbido por el crisol
m	=	masa del crisol 1.8 kg
Cp	=	Calor específico del crisol 0,31 Kcal/Kg°C
Tf	=	Temperatura de crisol para la fusión 900 °C
To	=	Temperatura ambiente 13 °C
t	=	0,36 h

$$Q_{\text{absor crisol}} = \frac{1.8 \cdot 0.31 \cdot (900 - 13)}{0.36} = 1374.85 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \text{ ó } 1604.259 \text{ W}$$

Calor útil para la fusión

$$Q_U = Q_{\text{carga metal}} + Q_{\text{absor crisol}}$$

Dónde:

Q_U	=	Calor útil para la fusión Kcal/h.
$Q_{\text{carga metal}}$	=	Calor que se entrega a la carga metálica $3012.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$
$Q_{\text{absor crisol}}$	=	Calor que es absorbido por el crisol $1374.85 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$
$Q_U = 3012.5 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 1374.85 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 4387.35 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} \text{ ó } 5119.428 \text{ W}$		

4.6.5 Cálculo de las pérdidas de calor

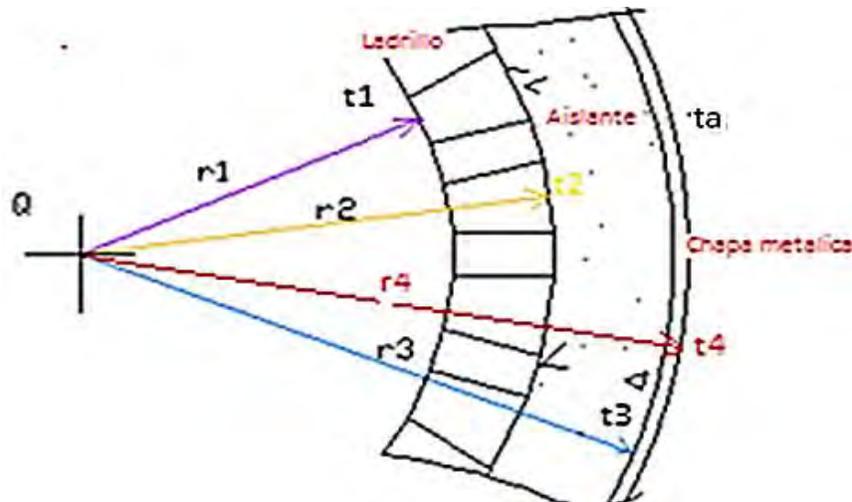
Es importante que la cantidad de calor que pasa a la carga sea la mayor posible, para de esta manera optimizar los costos del proceso, esto se puede conseguir analizando el calor suministrado al sistema y el calor útil aprovechado en el sistema ya se presenta pérdidas en las paredes cilíndricas y planas del horno tanto por conducción como por convección del horno. Se debe tomar en cuenta que para realizar el cálculo de las pérdidas de calor en las paredes del horno estas ya deben estar dimensionadas.

Perfil de temperaturas.

Se considera un perfil de temperaturas, correspondiente a la transferencia de calor por conducción en estado estacionario del cual se obtendrán las medidas fundamentales del horno.

Figura 4.16

Perfil de temperaturas



Nota: elaboración propia

La simbología correspondiente al gráfico anterior es:

T1=Temperatura de la pared interior del horno (°C).

T2-Temperatura de la intercara del refractario con la capa aislante (° C).

T3= Temperatura de la pared aislante y la chapa metálica del horno (°C).

T4 Temperatura exterior del horno (° C).

Ta Temperatura del medio ambiente (°C).

r1=Radio interior del horno (m)

r2= Radio de la intercara del refractario y la capa aislante del horno (m)

r3 = Radio de la intercara aislante y chapa metálica del horno (m)

r4= Radio exterior del horno (m)

Para el desarrollo de los espesores de las paredes del horno en estado estable se considera que el flujo de calor en la capa refractaria, capa aislante y flujo en el medio ambiente, es el mismo.

Con esta consideración se tiene:

$$Q_{\text{refra}} = Q_{\text{aisl}} = Q_{\text{chm}} = Q_{\text{amb}} = Q$$

Donde la simbología es:

Qrefra= Flujo de calor a través del Concreto refractario (W).

Qaisl= Flujo de calor a través de la capa aislante (W).

Qchm = Flujo de calor a través de la chapa metálica (W).

Qamb = Flujo de calor que sale al medio ambiente (W)

Las ecuaciones que rigen en estos procesos son:

Por Conducción

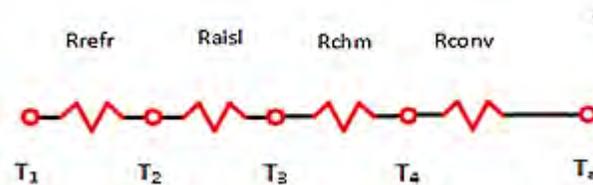
Paredes Planas $Q = \frac{Kc \cdot A \cdot (T1 - T2)}{L}$

Paredes Cilíndricas $Q = \frac{2\pi \cdot Kc \cdot L \cdot (T1 - T2)}{\ln \frac{r1}{r2}}$

De acuerdo al método de analogías eléctricas, mediante resistencias equivalentes para la determinación de la transferencia de calor por una unidad de longitud, en las paredes cilíndricas y por una unidad de área en las paredes del horno.

Figura 4.17

Analogías eléctricas, son equivalentes a la resistencia del horno.



Nota: elaboración propia

La simbología correspondiente a la figura anterior es:

Rrefra = Resistencia en el ladrillo refractario.

Raisl= Resistencia en la capa aislante.

Rchm = Resistencia en la chapa metálica.

Rcony- Resistencia en el aire debido al proceso de transferencia de calor por convección.

Rrad Resistencia en el aire debido al proceso de = transferencia de calor por radiación

Por lo tanto, las siguientes ecuaciones son las que rigen este proceso:

Por Convección

$$T_P = \frac{T_4 + T_A}{2}$$

Donde:

Tp = temperatura calculada

T_A = temperatura ambiente = 13° C ó 286° K

T₄ = temperatura chapa metálica = 67° C ó 340° K

$$T_P = \frac{340+286}{2} = 313^\circ \text{ K}$$

Coeficiente de las paredes del horno

Hallando el número de Raleigh.

$$Ra = \frac{g \cdot B \cdot (T_S + T_A) \cdot L^3}{V \cdot \dot{\alpha}}$$

Ra = número de Rayleigh

g = gravedad

T_S = temperatura de salida

T_A = temperatura ambiente.

L = altura = 0.0227 m

V = viscosidad cinética de 313°K es $1.72 \cdot 10^{-5} \frac{m^2}{s}$

$\dot{\alpha}$ = $24.42 \cdot 10^{-6} (\frac{m^2}{s})$

β = 0.03195

$$Ra = \frac{9.8 \frac{m}{m^2} \cdot 0.03195 \cdot (340+286) \cdot 0.0000117}{1.72 \cdot 10^{-5} (\frac{m^2}{s}) \cdot 24.42 \cdot 10^{-6} (\frac{m^2}{s}) \cdot \dot{\alpha}} = 0.470846 \cdot 10^9$$

Hallando el número de Nusselt

$$Nu = 0.825 + \frac{0,387 * Ra^{\frac{1}{6}}}{(1 + (\frac{0,492}{Pr})^{\frac{9}{16}}) \frac{16}{9}}$$

Ra = número de Rayleigh = $0,4708463527 \cdot 10^9$

Pr = número de Prank = 0,7

$$\mathbf{Nu = 69.873}$$

Se tiene:

$$hc_p = \frac{Nu * K}{L}$$

Donde:

hc_p = coeficiente de transferencia de calor por convección en las paredes

L = altura = 0,227 m

Nu = número de nusselt = 6,873

K = coeficiente de conductividad térmica del aire = $27,26 * 10^{-3}$ W/m°K

hc = 8,286 W/m²°K

Coficiente de la base del interior del horno

$$L = \frac{As}{P}$$

L = longitud de la plancha

As = área superficial de la plancha

P = perímetro

$L = 0,082$ m

$$\Rightarrow \mathbf{Ra = \frac{g\beta(T_s - T_a) * L^3}{\nu\alpha} = 2,219 * 10^7}$$

Hallando Nusselt

$$Nu = 0,15 Ra^{1/3}$$

$$\mathbf{Nu = 42,15}$$

Se tiene para hallar hc (coeficiente de transferencia)

$$hc_b = \frac{Nu * K}{L}$$

donde:

h_{c_p} = coeficiente de transferencia de calor por convección en la base.

$$H_{c_b} = 14.01 \text{ W/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

Coficiente en la tapa del horno

Número de Raleigh

$$Ra = 9.8 \cdot 0.0319489(418-340)(0.065)^3$$

$$Ra = 1,22 \cdot 10^7$$

numero de nusselt

$$Nu = 0,15 \cdot (1,22 \cdot 10^7)^{1/3} = 34.60$$

Coeficiente de transferencia de calor

$$H_{c_t} = Nu \cdot K/L = 34,60 \cdot 28,00 \cdot 10^{-3} = 14,90 \text{ w/m}^2 \text{ }^\circ\text{K}$$

Perdida De Calor En Las Paredes Del Cilindro:

K_A = conductividad térmica del ladrillo refractario = 0,403 Kcal/ m

T_1 = temp de la cámara de combustión 900°C = 1173°K

T_4 = temp de la chapa metálica 67°C = 340°K

L = altura del horno = 0,227 m

K_{ref} = conductividad térmica del ladrillo refractario 0,3 W/m°K

K_{chapa} = conductividad térmica de la chapa metálica 63,9 W/m°K

K_m cerámica = conductividad térmica de la manta cerámica 0,068 W/m°K

$$D_1 = 15,5 \Rightarrow r_1 = 7,75 = 0.075 \text{ m}$$

$$\text{Espesor del ladrillo} = 5,4 = 0.054 \text{ m}$$

$$D_2 = 26,3 \Rightarrow r_2 = 13,15 = 0.1315 \text{ m}$$

Espesor material cerámico= 2,55= 0,0255 m

$$D3 = 31,4 \Rightarrow r3 = 15,7 = 0,157\text{m}$$

Espesor de la chapa met.= 0,3 = 0,003 m

$$D4 = 32 \Rightarrow r4 = 16 = 0,16\text{m}$$

Por conducción:

$$Q_{\text{conduc}} = \frac{(T1-T4)}{2\pi \cdot 0,227 \left(\frac{1}{0,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}} + \frac{\ln\left(\frac{0,1315}{0,075}\right)}{0,068 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}} + \frac{\ln\left(\frac{0,157}{0,1315}\right)}{0,068 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}} + \frac{\ln\left(\frac{0,16}{0,175}\right)}{63,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}}} \right)}$$

$$Q_{\text{conduc}} = \frac{833^{\circ}\text{K}}{0,70(1,87+2,61+2,96 \cdot 10^{-4})} = \mathbf{265,61 \text{ W}}$$

Por convección:

$$Q_{\text{convec}} = \frac{(T4-TA)}{\frac{1}{2\pi r4 L h c}}$$

$$Q_{\text{convec}} = \mathbf{102,109 \text{ W}}$$

Perdida de calor total en la pared de la cámara del cilindro.

$$Q_{t \text{ cilind}} = Q_{\text{conduc}} + Q_{\text{convec}}$$

$$Q_{t \text{ cilind}} = 265,61\text{W} + 102,109 \text{ W} = 365,72 \text{ W}$$

$$1 \text{ W} = 0,857 \text{ Kcal}$$

$$\Rightarrow 365,72 \text{ W} * 0,857 \text{ J/Kcal/h} = \mathbf{313,42 \text{ Kcal/h}}$$

Perdida de calor en la base del horno.

Por conducción:

$$Q_{conduc} = \frac{(T1-T4)}{\frac{e_{ref}}{K_{ref}*A} + \frac{e_{chapa}}{K_{chapa}*A} + \frac{e_{ceramico}}{K_{ceramico}*A}}$$

T1 = temp. en la cámara de combustión = 1173 °K

T4 = temp de la chapa metal = 340 °K

A = area de la base 0,0189 m²

Kref = conductividad térmica del ladrillo refractario 0,3 W/m°K

Kchapa = conductividad térmica de la chapa metálica 63,9 W/m°K

Km cerámica = conductividad térmica de la manta cerámica 0,068 W/m°K

e_{refrac} = espesor refractario = 0,054 m

e_{m cerámico} = espesor manto cerámico = 0,0255 m

e_{chapa} = espesor chapa = 0,003 m

$$Q_{conduc} = \frac{(1173^{\circ}\text{K}-340^{\circ}\text{K})}{\frac{0,054}{\frac{0,3\text{W}}{\text{mK}}*0,0189\text{m}^2} + \frac{0,003}{63,9\frac{\text{W}}{\text{m}}^{\circ}\text{K}*0,0189\text{m}^2} + \frac{0,0255}{\frac{0,068\text{W}}{\text{m}}^{\circ}\text{K}*0,0189\text{m}^2}}$$

$$Q_{conduc} = 28,3646 \text{ w} = \mathbf{24,3085 \text{ Kcal/h}}$$

Por convección:

$$Q_{convec} = \frac{(T4 - TA)}{A h_c}$$

Ta = temperatura ambiente. = 286 °K

T4 = temp de la chapa metal = 340 °K

A = área de la tapa 0,0189 m²

hc_{base} = 14,01 W/m²*°K

$$Q_{convec} = \frac{(340-286)}{0,0189\text{m}^2 * 14,01\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}}$$

$$Q_{\text{convec}} = 203,9275 \text{ W} = 174,7659 \text{ Kcal/h}$$

Pérdida total en la base del horno:

$$Q_{\text{t base}} = Q_{\text{convec}} + Q_{\text{conduc}}$$

$$Q_{\text{t base}} = 24,3065 + 174,7659 = 199,072 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Pérdida de calor en la tapa del horno.

Por conducción:

$$Q_{\text{conduc}} = \frac{(T_1 - T_4)}{\frac{e_{\text{ref}}}{K_{\text{ref}} * A} + \frac{e_{\text{chapa}}}{K_{\text{Chapa}} * A}}$$

$$e_{\text{ref}} = 0,054 \text{ m}$$

$$e_{\text{chapa}} = 0,003 \text{ m}$$

$$A = \text{area de la tapa} = 0,0207 \text{ m}^2$$

$$Q_{\text{conduc}} = \frac{(1173 - 340)}{\frac{0,054}{0,3 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}} * 0,0207 \text{ m}^2} + \frac{0,003}{63,9 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{K}} * 0,0207 \text{ m}^2}}$$

$$Q_{\text{conduc}} = 95,7691 \text{ W} = 82,0741 \text{ Kcal/h}$$

Por convección:

$$Q_{\text{conveccion}} = \frac{(T_1 - T_4)}{A h_c}$$

$$T_a = \text{temperatura ambiente.} = 286 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$T_4 = \text{temp de la chapa metal} = 340 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$A = \text{area de la tapa} = 0,0207 \text{ m}^2$$

$$h_{c \text{ tapa}} = 14,90 \text{ W/m}^2 \text{ }^{\circ}\text{K}$$

$$Q_{\text{convec}} = \frac{(340 - 286)}{0,0207 * 14,90 \frac{\text{W}}{\text{m}^2 \text{ }^{\circ}\text{K}}} = 175,0802 \text{ W} = 150,0437 \text{ Kcal/h}$$

Pérdida total de calor de la tapa.

$$Q_{t \text{ tapa}} = 82,0741 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 150,0437 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = \mathbf{232,118 \text{ Kcal/h}}$$

Perdida calor por radiación del metal.

$Q_r = \text{calor de radiacion}$

$Q_n = \text{flujo de calor debido a la emisividad del metal fundido}$

$\sigma = \text{constante de radiación de Steven Boltzmann} = 5,67 * 10^{-8} \text{ W/m}^2\text{K}^4$

$A = \text{area de la superficie} = 0,3317\text{m}^2$

$T = T_s \Rightarrow 67 \text{ }^\circ\text{C} = 340\text{K}$

$\varepsilon = 0,7 \text{ por factor de emisividad del metal fundido a } 900\text{ }^\circ\text{C}$

$$Q_n = \varepsilon \sigma A T^4$$

$$Q_n = 0,7 * 5,67 * 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}^4} * 0,3317\text{m}^2 (340\text{K})^4$$

$$\mathbf{Q_n = 175,9309 \text{ W} = 150.7728 \text{ kcal/h}}$$

Pérdida de calor por radiación

$$Q_r = Q_n \varepsilon$$

$$Q_r = 150,7728 \frac{\text{kcal}}{\text{h}} * 0,7 = \mathbf{105,541 \frac{\text{kcal}}{\text{h}}}$$

Perdida de calor por gases de chimenea.

Para determinar este valor de la pérdida de calor por gases de chimenea del se debe tener en cuenta lo siguiente:

1.- si la tapa del **horno** es hermética la perdida no supera el 2 % del calor total aportado al horno

2.- si la tapa está montada con holguras y fugas la perdida puede alcanzar el 8% o incluso superar este valor

$$Q_g = \text{perdida de calor de gases de chimenea}$$

$$Q_g = 8\% * Q_U$$

$$Q_g = 0,08 * 4387,35 \text{Kcal/h} = 342,988 \text{ Kcal/h}$$

Perdida de calor total del horno.

$$Q_{p \text{ paredes}} = Q_{t \text{ cilindro}} + Q_{base} + Q_{tapa} + Q_r + Q_g$$

$$Q_{p \text{ paredes}} = 313,42 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 199,072 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 232,118 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + \frac{105,541 \text{Kcal}}{\text{h}} + \frac{342,988 \text{Kcal}}{\text{h}}$$

$$Q_{p \text{ total}} = 1193,139 \text{ Kcal/h}$$

Calculo del calor liberado por el combustible.

$$Q_{Co} = Q_U + Q_{P \text{ total}}$$

Reemplazando:

$$Q_{Co} = 4387,35 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} + 1193,139 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}} = 5580,489 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}$$

Calculo de eficiencia

$$\frac{\text{calor aportado ala carga}}{\text{combustible consumido para calentar la carga}} * 100\%$$

En condiciones óptimas y adecuado funcionamiento del horno industrial se pueden obtener rendimientos de hasta 68%, los gases son capaces de transferir calor a la carga únicamente si están más calientes que ella (Trinks, 1975, p 123).

$$\text{Reemplazando: } \frac{4387,35 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}}{5580,489 \frac{\text{Kcal}}{\text{h}}} * 100\% = 78.61\%$$

Tabla 4.8

Resumen del balance de energía en la fundición de aluminio.

PRODUCIDOS (Kcal/ h)	CONSUMIDOS (Kcal/h)
Calor liberado combustible (Q _{co}) = 5580.489	Calor útil de fusión (Q _u) = 4387.85
	Calor perdido total (Q _p) = 1193.39
	Rendimiento 78.61%

Nota Elaboración propia.

Figura 4.18

Rolado y soldado de la chapa metálica del cuerpo del horno



4.6.6 Construcción de la cámara de combustión

Es de carácter importante en la elaboración de la cámara de combustión, el correcto uso adecuado del concreto refractario, logrando de esta manera el rendimiento y evitar que se deteriore en la operación.

La cámara de combustión del horno está conformada de los siguientes elementos:

- Base de la cámara de combustión.
- Cuerpo de la cámara de combustión
- Armado de la cámara de combustión.

4.6.7 Base de la cámara

La construcción de la base de la cámara estará constituida por ladrillos refractarios y concreto refractario, donde se realiza en la base de la estructura metálica de la cámara de combustión, los ladrillos refractarios se colocan en la parte del medio, y se deja espacios vacíos alrededor de acuerdo a la forma de la estructura y para unir los ladrillos refractarios y la estructura metálica se tendrá vaciar con el concreto refractario. El propósito de la base refractaria de la cámara es para evitar la pérdida de calor, soportar el ataque de la llama y el soporte del cuerpo refractario de los ladrillos de la cámara de combustión.

4.6.8 Cuerpo de la cámara de la cámara de combustión

Para la construcción del cuerpo de la cámara de combustión se inicia desde el plano del diseño del horno para tener en cuenta que se debe preparar y la cantidad de elementos que necesita para su construcción del cuerpo de la cámara de combustión, en este caso se debe seguir el siguiente:

- Corte de los ladrillos refractarios
- Preparar ladrillos de cuña
- Tallado de canales en los ladrillos de cuña.

Figura 4.19

Trazado de corte de ladrillos refractarios base



Corte de los ladrillos refractarios

Se debe cortar 07 ladrillos refractarios de forma rectangular por la mitad, donde luego serán preparados y formados con las dimensiones requeridas de acuerdo al diseño del horno.

Figura 4.20

Trazado de corte de ladrillos refractarios



Figura 4.21

Corte De Ladrillos



Figura 4.22

Ladrillos en cuña para la cámara de combustión.



Figura 4.23

Disposición de ladrillos para la cámara de combustión



Tallado de canales en los ladrillos de cuña.

La importancia del rendimiento del horno son los canales dispuestos en la pared de la cámara de combustión, por tal motivo se debe tallar los canales de turbulencia en los ladrillos refractarios de cuña preparados, los ladrillos de cuña serán escogidos de acuerdo a la ubicación que se da en el diseño, los canales serán parte del volumen total de la cámara de combustión y mejoran la permanencia de la llama en la cámara.

Figura 4.24

Canales de turbulencia y agujero de entrada de quemador.



Los ladrillos tallados son 06 según el diseño y otro ladrillo es tallado con un corte circular para la entrada de la tobera del quemador

4.6.9 Conformado de la cámara de combustión

Para construir la cámara de combustión se debe tener todos los elementos que se requiere en donde han sido contruidos y preparados. Para que estos elementos sean unidos y se convierta en un solo componente que dará la forma de la cámara de combustión se debe realizar lo siguiente:

- Preparación del concreto refractario
- vaciado y fraguado
- Ubicación de los elementos de la cámara de combustión

Preparación de concretos refractarios

Este tipo de concreto se tiene que suministrar seco, únicamente mezclado con agua potable fría, tal fuera un concreto común, en formaletas de metal. Se resalta que antes de agregar agua primero es necesario, mezclar la totalidad de la bolsa, para obviar cualquier segregación producida

durante el almacenamiento o transporte cuando esté totalmente homogeneizada la mezcla. En caso de tener un exceso de agua las partículas detalladas se segregarán, dando una disminución de las propiedades mecánicas del horno. Por otra parte, de no ser suficiente, las reacciones de hidratación serán incompletas, y no habrá consistencia apropiada. Posterior al proceso de mezclado, se debe vaciarse en formaletas, de la mampostería, ya sean de madera o metal. Antes que nada, es recomendable eliminar completamente el óxido para facilitar el desmoldado. Finalmente, el secado del elemento es gradual, a 120° C por lo menos durante 24 horas de permanente calor

El secado del elemento se recomienda realizarlo en forma gradual, si por alguna razón no se puede seguir la curva de secado se debe garantizar la permanencia del elemento a 120° C durante 24 horas recibiendo calor indirectamente

Vaciado y fraguado

En esta etapa de la construcción se debe realizar el vaciado y fraguado del concreto refractario y posteriormente se debe realizar el curado con el cemento refractario para su resanado y acabado. El vaciado del concreto refractario se realizará en los siguientes elementos:

- Vaciado de la base de la cámara de combustión.
- Vaciado del cuerpo de la cámara de combustión.
- Vaciado de la base de la cámara de combustión

Para realizar el vaciado de la base de la cámara de combustión se debe usar concreto refractario donde nos servirá para la base de los ladrillos de cuña y en la base se ubicará los ladrillos para dar la forma que debe tener la cámara de combustión de acuerdo a las dimensiones del diseño, teniendo en cuenta que el modelo de referencia será el crisol para las medidas y espacios que tiene el interior la cámara de combustión del horno. ver fig. 3.25

Figura 4.25

Vaciado de la base de la cámara



Al fraguar el concreto refractario de la base, se debe realizar el curado de la parte circular que va ser la plantilla para de la formación cilíndrica de la cámara de combustión, se debe ubicar la posición de la entrada de la tobera del quemador teniendo que orientar tangencialmente al círculo de la base y para que cuando la llama ingrese no tenga resistencia y genere turbulencia en forma de remolino en el contorno del crisol.

Figura 4.26

Orientación tangencial del quemador en la cámara de combustión



Determinado la posesión de la tobera se fija con soldadura a la estructura metálica de la cámara y luego se le coloca el crisol para ubicar su posición con respecto a la tobera, el punto de inicio para colocar y posicionar los ladrillos será la tobera del quemador.

Figura 4.27

Ubicación de la tobera del quemador y crisol



Vaciado del cuerpo de la cámara de combustión

Para el vaciado del cuerpo antes se debe realizar el conformado de los ladrillos refractarios que se encuentran tallados en cuña. Para iniciar a colocar los ladrillos se empieza de la parte de la tobera ya que se realizó un corte en forma de circunferencia en dos ladrillos para alojar la entrada de la tobera del quemador, para que los ladrillos formen perfectamente la forma cilíndrica requerida se usa como molde el propio crisol para protegiéndolo tanto externa como internamente para evitar cualquier daño, la disposición de los ladrillos está determinada por ubicación de los ladrillos que cuentan con los canales y estos deben estar intercalados, se procede a verter el cemento refractario en la aberturas entre ladrillos, para que no se desplacen los ladrillos y fragüe el cemento refractario en un tiempo adecuado se fijan los ladrillos con alambre por la parte exterior del ladrillo.

Figura 4.29

Posicionamiento de los ladrillos refractarios de cuña para su conformado.



Figura 4.30

Preparación del cemento refractario.



Figura 4.31

Conformado de los ladrillos refractarios



El vaciado de la parte exterior de la cámara de combustión, se inicia colocando el material aislante como la manta cerámica y luego se vierte el concreto refractario entre la estructura metálica y los ladrillos, en donde se formará una sola pieza que estará constituido por cuatro paredes que es la estructura metálica, concreto refractario, aislante térmico y el ladrillo refractario donde se tendrá mayor resistencia estructural y menores pérdidas de calor.

Figura 4.32

Vaciado final de la cámara de combustión.



Cuando fragüe el concreto refractario se debe realizar el curado de la cámara de combustión dándole un acabado para su secado y posteriormente su funcionamiento.

Figura 4.33

Curado de la cámara de combustión.



4.6.10 *Construcción de la tapa de retorno*

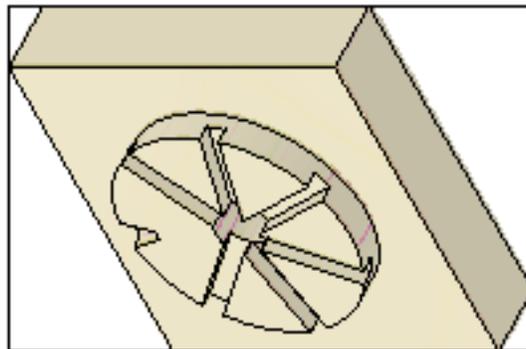
La tapa del horno tiene como diseño que debe tener canales de retorno y que al cerrar la tapa se debe alinear entre los canales de la cámara de combustión, para que los gases de escape y las llamas que excedan de la cámara serán canalizadas para que suban y retornen directamente a la carga del crisol, esta propuesta es para recircular los gases, tener permanencia de la llama en la cámara y mejorar la quema de su combustible.

Para la construcción de la tapa de retorno del horno se debe realizar lo siguiente:

- Trazado y corte de ladrillos refractarios
- Tallado de canales en los ladrillos refractarios
- Armado de la tapa de retorno

Figura 4.34

Corte de ladrillos de la tapa



Trazado y corte de ladrillos refractarios

La tapa consta de 02 ladrillos refractarios rectangulares donde se debe trazar una círculo que debe ser a la medida de la cámara de combustión para tener un adecuado cerrado, al cortar los ladrillos refractarios de la parte trazada se debe tener la forma circular sobre saliente y con la altura indicada

Figura 4.35

Trazado de los ladrillos.



Figura 4.36

Corte del ladrillo para la tapa.



Figura 4.37

Forma del ladrillo para la tapa de retorno



Tallado de canales en los ladrillos refractarios

Con los ladrillos preparados se prosigue al tallado de los canales en la parte circular sobresaliente, donde se debe hacer 06 canales que al cerrar serán alineados con los canales de la cámara de combustión, los canales de la tapa en la parte donde se junta se debe tallar un orificio para la chimenea del horno que logre mantener la llama constante sin que pierda gran cantidad de calor, con esta chimenea el horno no se apaga y tampoco se ahogara con sus gases de escape.

Figura 4.38

Tallado de canales de retorno.



Armado de la tapa de retorno

Para armar la tapa realizamos la prueba en los 06 canales tallados donde se le ataca con una llama directa y debe resultar que la llama sea canalizada saliendo directamente en el medio, si uno de los canales está desviando la llama se tendrá que alinear con el tallado para que los síes canales sean iguales y lograr que los canales de la tapa retornen la llama y ataquen directamente a la carga del crisol.

Figura 4.39

Prueba de canales de retorno.



Figura 4.40

Fijado de ladrillos de la tapa.



Figura 4.41

Trazo de soporte de base del crisol.



4.6.11 Construcción del soporte de base del horno de crisol

La construcción de la estructura metálica de basculamiento será el bastidor metálico que soportara todo el peso del horno y sus componentes que integran en el horno, por tal motivo el diseño del bastidor debe cumplir los siguientes requerimientos:

- El bastidor debe ser funcional en la operación.
- Soportar el peso y movimiento de basculamiento del horno

El bastidor del horno deberá ser construido teniendo en cuenta el siguiente orden:

- Estructura metálica de soporte del bastidor
- Bases de sujeción del eje de basculamiento
- Montaje de cámara de combustión
- Mecanismo de basculamiento del horno

Estructura metálica de soporte del bastidor

El bastidor se construirá con tubería y perfiles de acero, con dimensiones determinadas que serán unidos mediante soldadura en las uniones rígidas, con tornillos y pernos en los acoples desmontables, con bisagras en las partes sujetas a movimiento ocasionales, con rodamientos para el sistema giro o basculamiento, y engranes para el sistema de transferencia de esfuerzos. El bastidor estará integrado de dos soportes en arco principales lado izquierdo y derecho que soportan toda la carga del horno que se encontraran unidas a una base cuadrante que sirve para dar mayor estabilidad, rigidez al bastidor y protección en la operación del horno. Donde se podría acondicionar garruchas para su desplazamiento a su ubicación determinada, este sistema también serviría para el almacenamiento.

Figura 4.42

Trazo de soporte de base del horno de crisol.

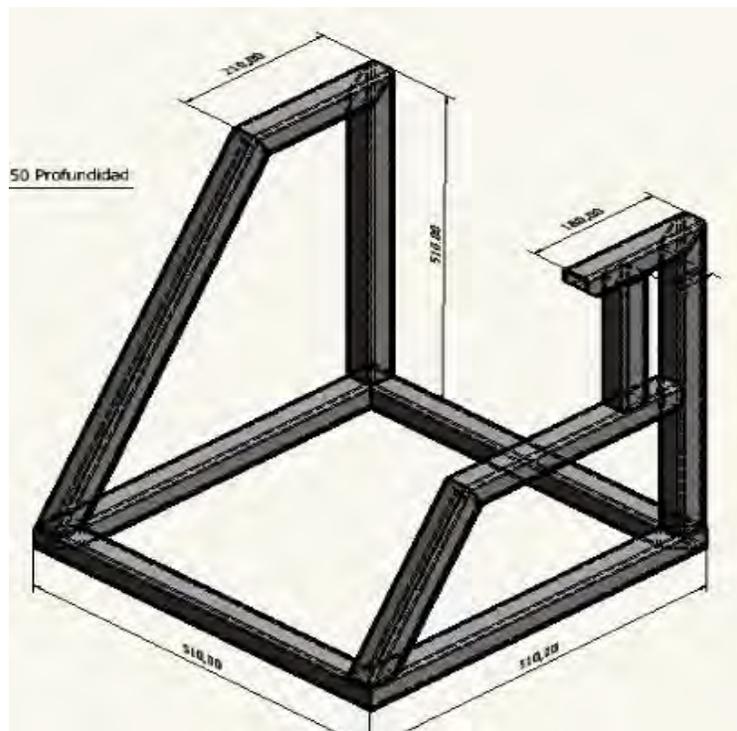


Figura 4.43

Construcción del bastidor del horno.



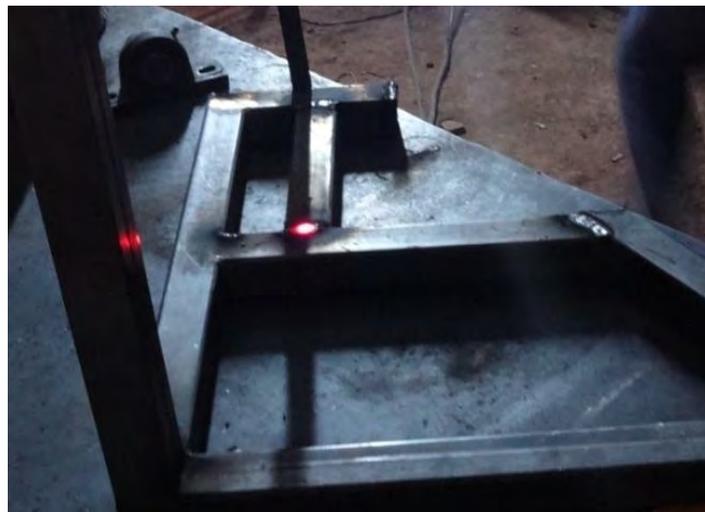
Figura 4.44

Presentación de bastidor.



Figura 4.45

Reforzado de uniones con soldadura.



Bases de sujeción del eje de basculamiento

Los ejes de sujeción se soldarán en los dos lados de la estructura de la cámara de combustión que deben estar a la misma altura y alineados para su movimiento de basculamiento balanceado y resistir el peso del horno. Posteriormente se posiciona la estructura metálica de la cámara de combustión con los ejes fijados en el bastidor del soporte lado derecho e izquierdo en la parte superior donde se debe colocar dos rodamientos con sus bases de fijación (chumaceras) de

acuerdo a las dimensiones del eje, luego se determina la posición de los pernos de la chumacera que se soldara y se fijara con las tuercas.

Figura 4.46

Ubicación del eje y pernos de la chumacera



Figura 4.47

Soldadura de ejes de sujeción y balanceo.



4.6.12 Mecanismo de basculamiento del horno

Para que el basculamiento del horno sea controlado y manejable, se le construye un mecanismo de engranajes mediante la relación de transmisión donde el engranaje piñón que tiene la función de desmultiplicar la fuerza requerida para accionar el basculamiento que cuenta con una

relación de 4.5 á 1 con la rueda dentada de mayor diámetro como transmitida y el piñón como transmisora de movimiento, para mayor maniobrabilidad se le colocara una manilla que facilitara el control de basculamiento durante la colada de material fundido

Figura 4.48

Sistema de volteo basculamiento del horno

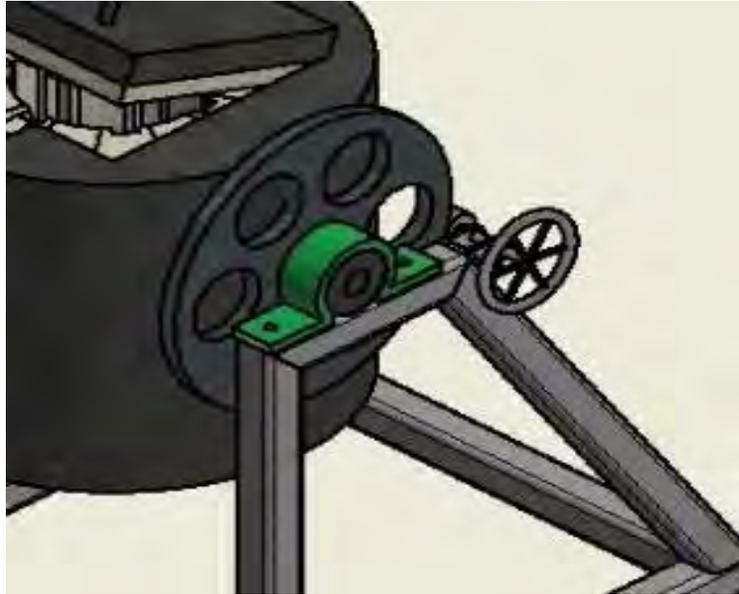


Figura 4.49

Sistema de volteo para la colada.



Figura 4.50

Sistema de volteo para la colada



4.6.13 Armado del quemador del horno

El quemador que se va utilizar en el horno debe ser armado y se empieza desde la tobera colocando sus accesorios como los niples de conexión de gas, llaves de entrada gas, y manómetro de gas. Los accesorios deben ser sellados y ajustados para evitar fugas de gas, teniendo armado el quemador se instala con el balón de gas y se prueba su funcionamiento observando la distancia y color de la llama.

Figura 4.51

Quemador del horno armado



Figura 4.52

Prueba del quemador



La selección del modelo de la turbina del horno es por el requerimiento de aire que necesita para la combustión del gas, entonces en la turbina se procede a modificar según la especificación de los planos del horno, teniendo en cuenta el montaje de la turbina será con la llave de paso hacia el quemador y el motor eléctrico tendrá su base al costado de la turbina un acoplamiento directo a la turbina

Figura 4.53

Soldadura y construcción de la turbina.



Figura 4.54

Soldadura y construcción de la turbina



El armado del quemador se concluye fijando tobera con la turbina armada, esto resulta que el quemador será montado en el motor en un solo componente y con esta modificación el quemador no se desacopla y se moverá junto con el horno cuando realice el basculamiento para descargar la carga fundida de metal, entonces el horno estará en funcionamiento continuo porque el suministro de gas no se cierra y motor eléctrico funciona.

4.6.14 Ensamblaje del horno

Con los componentes construidos y armados se procede a ensamblar el horno realizando en orden y con las medidas de seguridad, entonces procederá de la siguiente manera:

- La estructura metálica de la cámara, donde se encuentra la cámara de combustión componente principal del horno donde se montará con las chumaceras coladas en los dos ejes de sujeción y balanceo donde se fijarán por pernos y tuercas en la base superior del bastidor.
- Instalar el mecanismo de basculamiento del horno al lado derecho del bastidor
- Montaje del quemador y fijar con pernos la tobera con la entrada del horno que se encuentra en el lado izquierdo

- Montaje de la tapa de retorno que será fijado con bisagras y luego se soldaran en la parte superior de estructura metálica de la cámara.

Figura 4.55

Ensamblaje de turbina y quemador



4.6.15 Funcionamiento del horno

El funcionamiento del horno tiene con fin otorgar información valiosa que permite comparar los valores reales con los teóricos del diseño. Se evaluará su funcionamiento pues determina el éxito del diseño y que es necesario modificar para que cumpla los objetivos del diseño.

Figura 4.56

Pruebas de encendido del horno



Figura 4.57

Turbulencia generada en los canales de la cámara del horno



CAPITULO V. RESULTADOS Y DISCUCIONES

5.1 Resultados del horno

Para el análisis de resultado se realizaron diferentes pruebas en el horno

5.2 Pruebas del horno

Se realizaron tres tipos de pruebas en el horno para obtener los datos de tiempo, carga y temperatura. Las pruebas que se tomaron en cuenta fueron las siguientes:

- Pruebas de precalentamiento
- Pruebas de funcionamiento
- Pruebas de fusión

5.2.1 Pruebas de precalentamiento

La prueba de precalentamiento se realiza en horno, herramientas, moldes y carga metálica con el objetivo de: (ver tabla 5.1)

- Extraer la humedad que se encuentra en el interior del horno como en las paredes de la cámara de combustión crisol y tapa deterioro de las materiales en el momento de la fundicion
- Reducir el choque termico en el horno
- Mantener la vida util de sus componentes

Tabla 5.1

Datos de precalentamiento

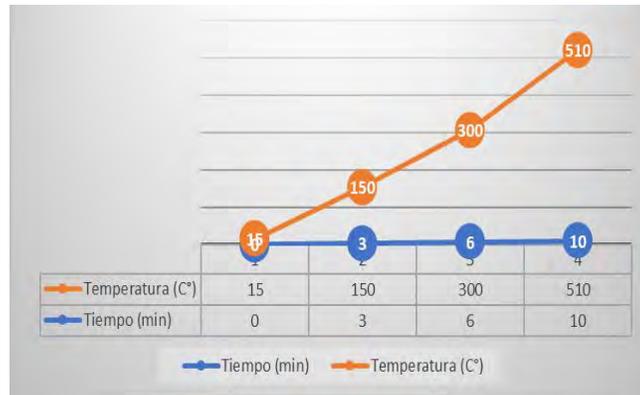
Tiempo (min)	Temperatura (C°)
0	15
3	150
6	300
10	510

Nota: elaboración propia

Dicha prueba se realiza de manera continua, a baja presión de la llama sin carga metálica, para evitar choques térmicos y pérdidas de temperatura por la manipulación de las herramientas de manejo, carga y moldes de colada, como se observa en la tabla 5.1

Cuadro 1

Gráfico tiempo-temperatura de pre calentamiento



5.2.2 Pruebas de funcionamiento

Esta prueba se realizó con la finalidad de conocer y alcanzar los datos máximos en funcionamiento sin carga, la resistencia y comportamiento de sus materiales y equipamiento del horno (ver tabla 5.2)

Tabla 5.2

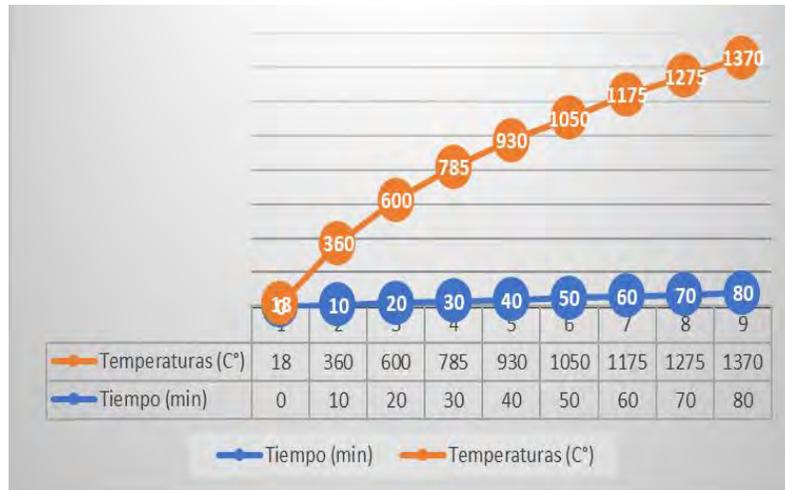
Datos de funcionamiento

<i>Tiempo (min)</i>	<i>Temperaturas (C°)</i>
<i>0</i>	<i>18</i>
<i>10</i>	<i>580</i>
<i>20</i>	<i>680</i>
<i>30</i>	<i>785</i>
<i>40</i>	<i>910</i>
<i>50</i>	<i>1100</i>
<i>60</i>	<i>1185</i>
<i>70</i>	<i>1275</i>
<i>80</i>	<i>1370</i>

Con los datos obtenidos de la prueba de funcionamiento se llega a tener una temperatura máxima de 1370 grados a un tiempo de 80 minutos, donde con esta temperatura se podría llegar a fundir algunos materiales no ferrosos con un consumo de GLP de 2.5 kg = 0.00463 m³

Cuadro 2

Tiempo- temperatura de funcionamiento



5.2.3 Pruebas de fusión

Para la prueba de fusión se realizó la fundición de 5 kg de chatarra de aluminio en el horno de crisol basculante se llevará en tres pruebas distintas y luego obtener el promedio de tiempos de fusión de donde obtienen los siguientes datos:

- Peso de la carga 5 kg de Chatarra de Aluminio
- Sal de amoniac 23 gr
- Balon de GLP peso 17.2 kg

Tabla 5.3*Datos de prueba de fusión*

Tiempo		Temperaturas			
Tiempo (min)	Prueba 1	Prueba 2	Prueba 3	Promedio	
0	350	370	380	366.6	
5	420	435	450	435	
10	550	565	570	561.67	
15	630	640	660	643.33	
20	690	700	710	700	
25	730	740	750	740	

En la tabla 5.3 Se muestra el tiempo en donde la temperatura de fusión incrementa en la cámara de combustión donde el metal queda fundido a los 21.6 minutos a una temperatura promedio de 700 C° y a los 25 minutos incrementa la temperatura para la colada del metal de 740 C° con un consumo de combustible de 1.5 kg ó 0.00278 m³ por prueba, teniendo en cuenta que el horno debe estar precalentado antes de iniciar las pruebas

Cuadro 3*Tiempo temperatura de las pruebas de fusión*

5.3 Interpretación de datos

Se recopilaron todos los datos del balance de materia y energía para obtener sus rendimientos a partir de los productos resultantes como podemos observar en las tabla 5.4 y 5.5

Tabla 5.4

Balance materia

Entrada		Salida	
Peso material	5 kg	Pieza de Al	4.3 kg de Al
Peso NH ₄ Cl	23 gr		
		Escorias	= 700 gr
O ₂ requerido	= 3616.301gr	CO ₂	= 3013.793gr
O ₂ exceso	= 904.075gr	O ₂ exceso	= 904.075gr
GLP	=1000gr		
N ₂	=16876.070gr	N ₂	= 16876.070gr
Vapor H ₂ O	= 263.277gr	Vapor H ₂ O	= 263.277gr +1602.508gr
Total	= 22659.723gr	Total	= 22659.723gr

Nota: Elaboración propia

Tabla 5.5

Balance de energía

PRODUCIDOS (Kcal/ h)		CONSUMIDOS (Kcal/h)	
Calor liberado	= 5580.489	Calor útil de fusión (Q _u)	= 4387.85
combustible (Q _{co})			
		Calor perdido total (Q _p)	= 1193.39
		Rendimiento	=78.61%

Nota Elaboración propia.

5.4 Comparación de datos

Para la siguiente tabla 5.6 se tomaron como referencia de operación las conclusiones de las tesis elaboradas en la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica para comprobar la hipótesis planteada en el presente diseño de investigación aplicada.

Tabla 5.6

Comparación de datos de pruebas

	Masa de la carga de prueba	Cantidad de combustible consumido	Tiempo de fusión de la carga	Eficiencia de operación
A	5 kg de Al	1 kg GLP	21.6 min	78.61%
B	5 kg de Al	3.3kg GLP	35 min	45.70%
C	15 kg de Al	3.5kg GN	40 min	72.12%

Donde:

- A = Diseño y construcción de un horno basculante para la obtención de aleaciones no ferrosas de Kida Delgado y Ochoa Medina
- B= 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
- C= Diseño y construcción de un horno de crisol basculante a gas natural para fusión de aluminio

CAPITULO VI. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 Conclusiones

- En base al objetivo general de mejorar el diseño y construcción de un horno de crisol basculante para obtener aleaciones de metales no ferrosos de manera más eficiente y efectiva, se puede concluir que se logró desarrollar un horno que presenta mejoras significativas en términos de rendimiento, eficiencia y energética. Este avance representa un paso importante en la industria de metales no ferrosos, ya que permite obtener productos de manera más eficiente y sostenible.
- En términos de construcción, se utilizaron materiales de alta resistencia y durabilidad, lo que garantiza la integridad estructural del horno y prolonga su vida útil. Asimismo, se optimizaron los sistemas de aislamiento térmico para minimizar las pérdidas de calor y maximizar la eficiencia térmica, lo que resulta en un menor consumo de combustible.
- En cuanto al diseño del horno de crisol basculante, se logró mejorar la ergonomía y funcionalidad del equipo, haciendo que la llama se envuelva al crisol tiene una tapa de retorno con canales invertidos en la base de la tapa y que están alineados con los canales de las paredes de la cámara de combustión donde se redirecciona la llama hacia el interior del crisol lo que optimiza el aprovechamiento de calor del proceso de combustión. El horno permite obtener temperaturas de hasta 1350 °C , en el interior del horno sin carga, temperatura suficiente para fundir algunos metales no ferrosos, sin embargo esta temperatura obtenida es para probar la capacidad del horno y sus componentes, las pruebas se realizaron con 5 kg de aluminio reciclado, con un tiempo de fusión de 0.36h (21.6min), temperatura de colado de 750 °C y consumo de combustible GLP de 1kg.

- En cuanto a la eficiencia y efectividad del proceso de obtención de aleaciones no ferrosas, se observó una mejora significativa en los tiempos de fusión obtenidos. Mediante los cálculos de balance de energía se determina el rendimiento del horno donde su eficiencia térmica es de 78.61%.

- En resumen, el diseño y construcción del horno de crisol basculante, logró mejorar la eficiencia y efectividad en la obtención de aleaciones no ferrosas, aportando avances significativos en términos de diseño, construcción y rendimiento. Estas mejoras tienen un impacto positivo tanto en la industria de metales no ferrosos como en la sostenibilidad de los procesos de operación.

6.2 Recomendaciones.

a) Mantener las condiciones operativas del horno.

- El encendido al horno se debe realizar con un chispero para evitar accidentes.
- Realizar el calentamiento del horno entre 10 minutos y luego añadir la carga
- Realizar la fundición de la carga en procesos continuos para aprovechar que el horno se encuentra a temperaturas altas
- Limpiar y verificar los canales de la cámara de combustión y la tapa de retorno y luego que estén alineados y cierren entre sí para que la llama fluya adecuadamente en la cámara.

b) Seguridad industrial en la operación del horno.

- Al realizar la operación se empieza verificando los implementos de seguridad personal
- Verificar que las herramientas e implementos de fundición se encuentren en buenas condiciones.

ANEXOS

Anexo 1

Matriz de consistencia

Título: “DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN HORNO BASCULANTE PARA LA OBTENCIÓN DE ALEACIONES NO FERROSAS”				
PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLES	METODOLOGÍA
<p>¿Es posible innovar el diseño de ingeniería y construcción de un horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas?</p>	<p>Innovar el diseño y construcción de un horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas.</p>	<p>La innovación en el diseño y construcción del horno de crisol basculante permitirá optimizar el proceso de fusión de las aleaciones de metales no ferrosos.</p>	<p style="text-align: center;">VARIABLE INDEPENDIENTE:</p> <p>Diseño y construcción del horno basculante.</p> <p style="text-align: center;">Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Forma. • Tamaño. • Material. • Sistema de calentamiento. • Control de temperatura. 	<p style="text-align: center;">TIPO, NIVEL Y MÉTODO DE INVESTIGACIÓN</p> <ul style="list-style-type: none"> • Investigación tecnológica. • Descriptivo y correlacional simple con enfoque cuantitativo. • Hipotético deductivo.
PROBLEMAS ESPECÍFICOS	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	HIPÓTESIS ESPECIFICAS		
<ul style="list-style-type: none"> • ¿Se podrá modificar el diseño del sistema de calentamiento del horno convencional de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas? 	<ul style="list-style-type: none"> • Modificar el diseño del sistema de calentamiento del horno convencional de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas. 	<ul style="list-style-type: none"> • La modificación del diseño del sistema de calentamiento del horno convencional de crisol basculante contribuirá en la eficiencia del proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas. 		
<ul style="list-style-type: none"> • ¿Se puede perfeccionar la construcción del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas? 	<ul style="list-style-type: none"> • Perfeccionar la construcción del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante para optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas. 	<ul style="list-style-type: none"> • El perfeccionamiento de la construcción del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante permitirá optimizar el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas. 		<p style="text-align: center;">VARIABLE DEPENDIENTE:</p> <p>Producción de aleaciones no ferrosas.</p> <p style="text-align: center;">Dimensiones</p> <ul style="list-style-type: none"> • Cantidad. • Composición química.
<ul style="list-style-type: none"> • ¿Resulta ser eficiente el desempeño del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante en relación con los hornos tradicionales empleados para el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas? 	<ul style="list-style-type: none"> • Evaluar la eficiencia térmica del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante comparándolo con hornos tradicionales empleados para el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas, 	<ul style="list-style-type: none"> • La eficiencia térmica del nuevo sistema de calentamiento del horno de crisol basculante será mayor en relación con hornos tradicionales empleados para el proceso de fusión de aleaciones metálicas no ferrosas, 		<p style="text-align: center;">DISEÑO DE INVESTIGACIÓN</p> <p>No experimental de carácter transversal correlacional.</p> <p style="text-align: center;">RECOLECCIÓN DE DATOS</p> <p>Revisión de: catálogos de fabricante, textos de ingeniería de materiales y diseño de máquinas, artículos y tesis conexas.</p>

Nota: Elaboración propia.

Anexo 2

Castables y refractarios

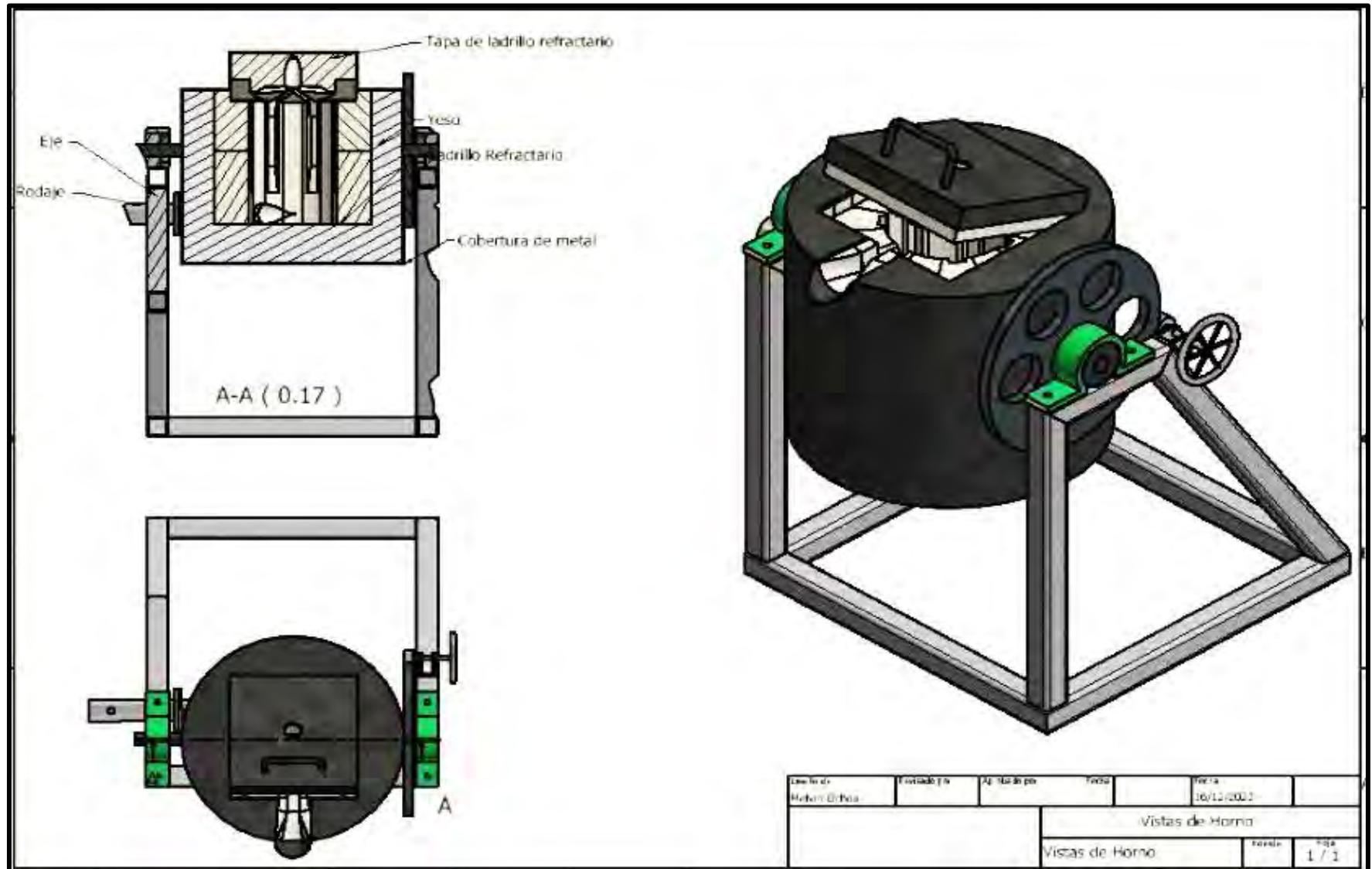
TABLA "E" CASTABLES REFRACTARIOS					
MARCA	MATERIAL BASE	CANT. (1) REQUERIDA	% DE AGUA NECESARIA	TEMP TIPICA DE USO (2)	USOS TIPIICOS (3)
DE RESISTENCIA MECÁNICA NORMAL					
CASTABLE REPSA	ARCILLA	1825	15	1370	Tapas de calderos, incineradores, paredes de calderos acetabulares bagaceros.
REPSA CASTABLE STANDARD	ARCILLA	1825	15	1370	Calderos pirotubulares, calderos acuotubulares, incineradores, cámaras de fuego.
REPSA BAFFLE MIX	ARCILLA	1825	15	1370	Construcción de deflectores de calderos acuotubulares tipo Sterling.
REPSA CASTABLE SUPER	ARCILLA	1875	15	1480	Incineradores, cámaras de combustión, calderos bagaceros, tapas de crisoles.
REPSA HARCAST	ARCILLA	2002	12	1540	Destilación primaria de petróleo, carros cerámicos, hornos de recalentamiento.
REPSA CASTABLE ALTA ALUMINA	ALUMINA	2160	09	1650	Conos de quemadores, hornos metalúrgicos, refinerías de petróleo, calderos.
REPSA CASTABLE 1- 76	ALUMINA	2340	14	1760	Hornos de inducción, conos de quemador, hornos metalúrgicos.
REPSA CHROMEPAK	CROMO-MAGNESITA	2089	08	1600	Mantenimiento de paredes y bóvedas de hornos metalúrgicos, hornos de fundición.
REPSA CASTABLE CROMO	CROMITA	2675	11	1420	Fogón de calderos bagaceros, hornos de forja y recalentamiento.
DE ALTA RESISTENCIA MECÁNICA					
REPSA CASTABLE EXTRA	ARCILLA	1940	14	1315	Pases de calderos pirotubulares, tapas de hornos de crisol, chutes de secadores.
REPSA HARCAST ES	ALUMINA	2300	13	1590	Refinería de petróleo, hornos de recalentamiento, enfriadores de clínquer.
REPSA CASTABLE 2-72	ALUMINA	2160	11	1590	Conos de quemador, hornos metalúrgicos, y de tratamiento térmico.
REPSA CASTOLAST G	ALUMINA	2530	10	1800	Hornos rotatorios de cemento, enfriadores de clínquer, reactores químicos.
REPSA CASTABLE CROMO ES	CROMITA	2580	12	1370	Hornos de plomo, calderos, hornos de tratamiento térmico.

Anexo 3*Ladrillos refractarios*

TABLA "B" LADRILLOS REFRACTARIOS DE ALTA ALUMINA				
CLASE*	MARCA	CPE (1)	TEMP ⁽²⁾ TIPICA TRABAJO	USOS Y APLICACIONES ⁽³⁾
50% Al ₂ O ₃	REPSA DIALITE	34	1600	Paredes de calderos, regeneradores y recuperadores de calor, horno de cal y cemento y vidrio.
	REPSA 61-65	34	1600	Cucharas para trasvase de acero, carros torpedos, artesas de colada continua.
60% Al ₂ O ₃	REPSA ANCHOR	35	1700	Hornos rotatorios de cal y cemento, calderos bagaceros, hornos metalúrgicos de recalentamiento.
	REPSA UFALA	35	1700	Altos hornos y estufas de altos hornos, carros torpedos, tanques de vidrio, hornos de inducción.
	REPSA ALADIN 60	35	1700	Cucharas de trasvase de acero líquido.

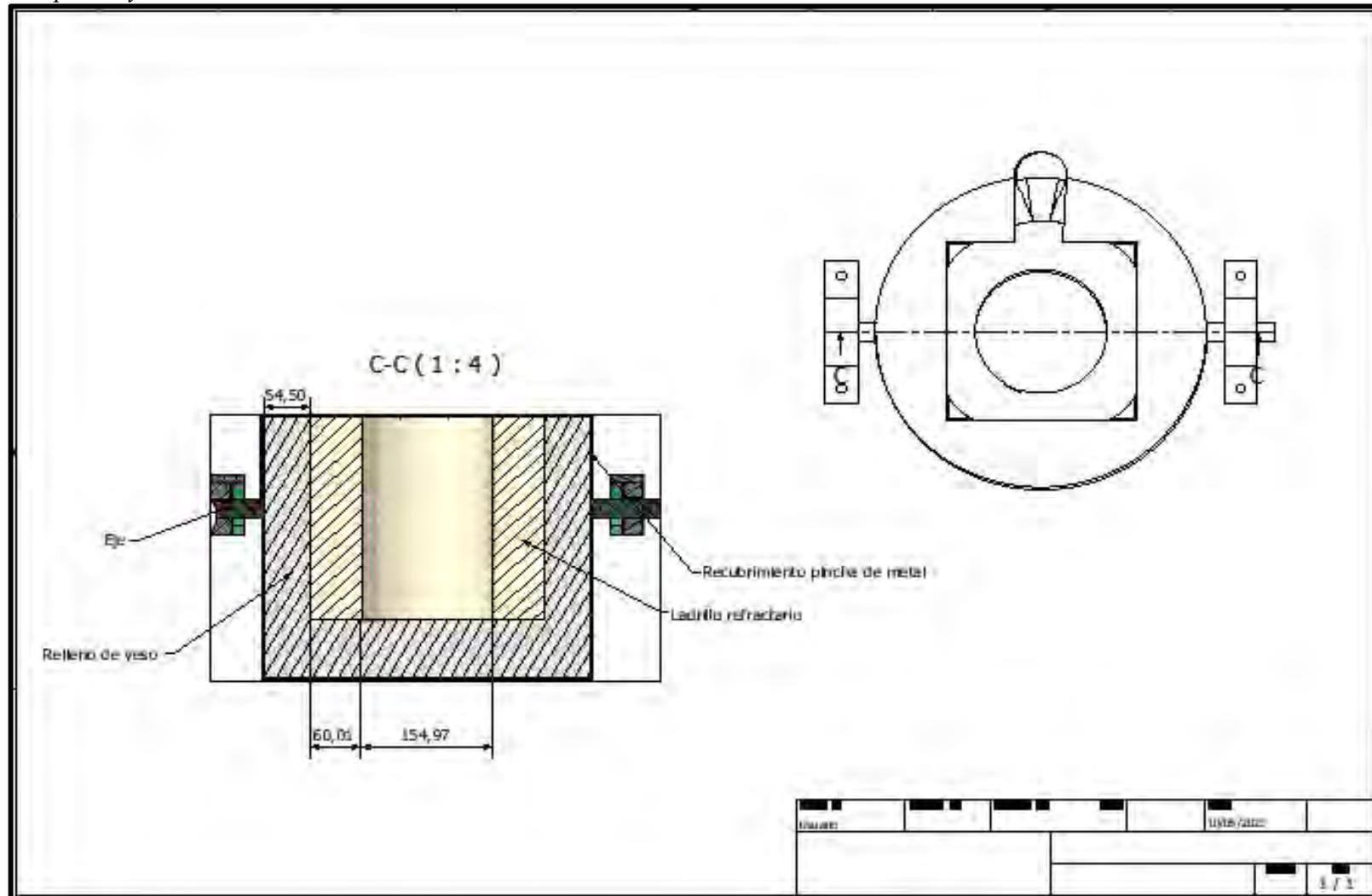
Anexo 4

Diseño del horno



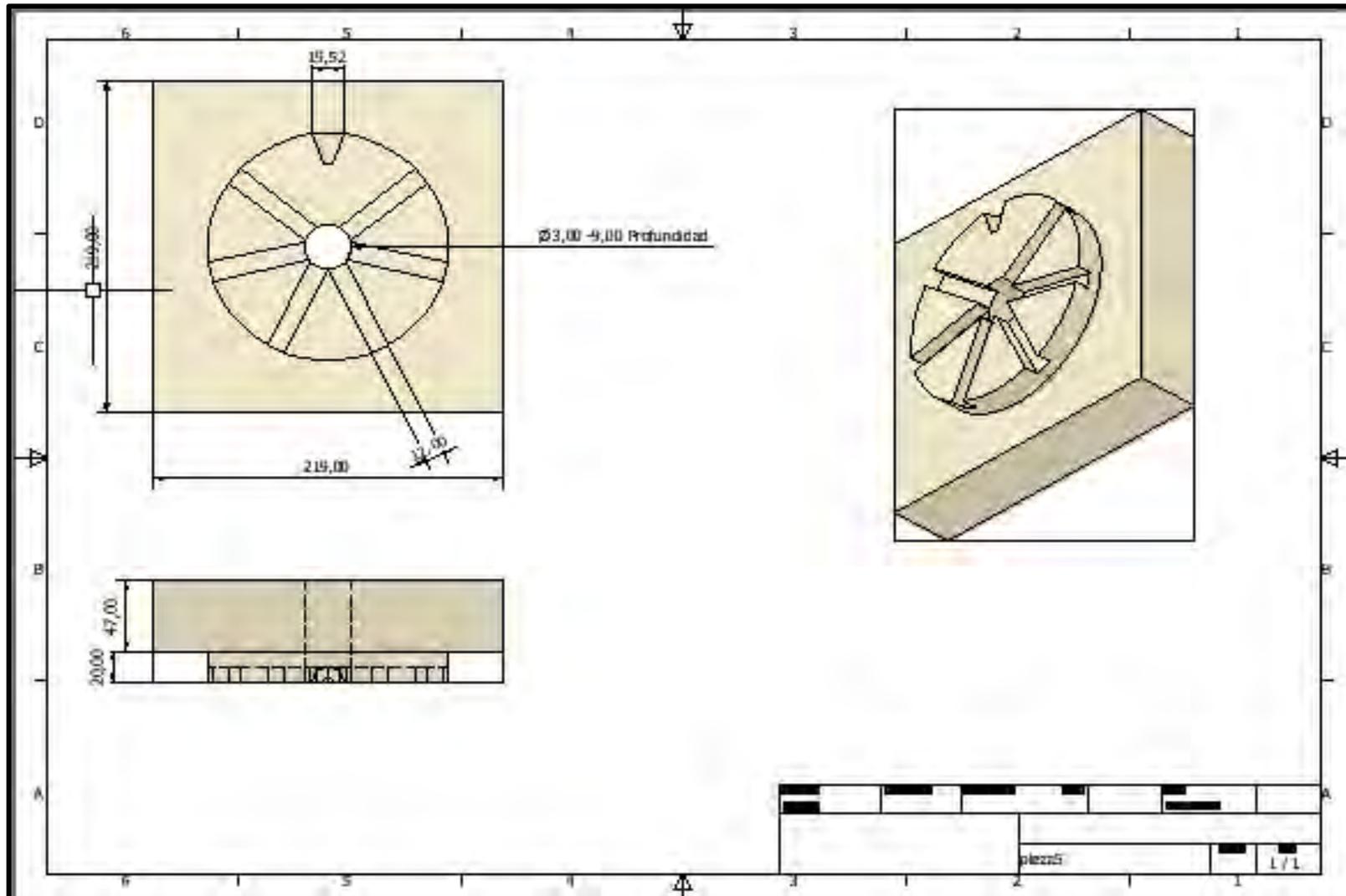
Anexo 5

Vista superior y lateral del horno



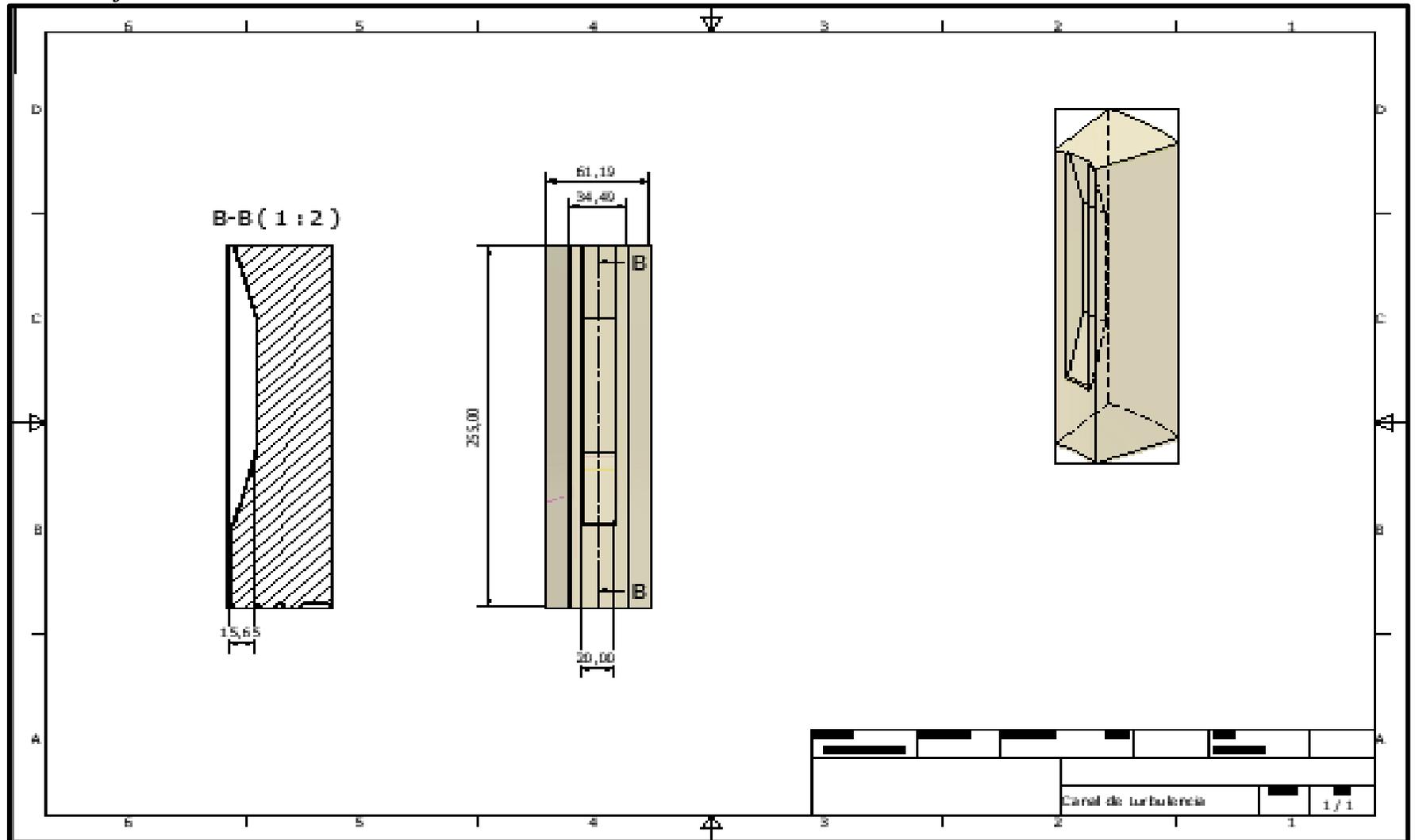
Anexo 6

Tapa del horno con canales de retorno



Anexo 7

Ladrillo refractario con canal de turbulencia



Bibliografía

Libros y Tesis

- Agencia Chilena de Eficiencia Energética. (17 de Febrero de 2018). *Guía Para la Calificación de Consultores en Eficiencia Energética*. Obtenido de http://old.acee.cl/577/articles-62222_recurso_3.pdf
- Agustin, M. (2011). *Apuntes de transmisión del calor*. Madrid.
- Borda, D. (2006). “Diseño y construcción de un horno de crisol utilizando GLP”. Cusco – Perú: Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco – Perú.
- Cabrera, D., & Morales, J. (2019). “Diseño y Construcción de un Horno crisol estacionario para reciclaje de chatarra de cobre de la. Cajamarca –Perú: Universidad Privada del Norte Cajamarca –Perú.
- Calero, R. (1999). *Fundamentos de mecanismos y máquinas para ingenieros*. McGraw Hill/Interamericana de España.
- Calvo, C. (2015). *Hornos Utilizados en la Fabricación de Aleaciones Ferrosas y no Ferrosas*. Scientia ISSN.
- Castillo, P. (13 de Enero de 2011). *Manual Práctico de la combustión industrial*. Obtenido de https://www.sistemamid.com/panel/uploads/biblioteca/2015-01-25_10-01-39113913.pdf
- Castillo, P. (2015). *Manual práctico de la combustión industrial*. España.
- Cegarra Sánchez, J. (2004). *Metodología de la Investigación Científica y Tecnológica*. Madrid: Ediciones Díaz de Santos.
- Champa, O. (2009). *Introducción a la transferencia de calor*. Lima.
- Conesa, J. (2013). *Mecanismo de transferencia de calor*. Mexico.
- Díaz Del Castillo, F. (2015). *Tecnología de Materiales*. Departamento de Ingeniería, Universidad

Nacional Autónoma de México-UNAM.

Elez, D. (2016). *Diseño de estructura básica de nave industrial*. Valencia.

Gingery, D. (2013). *Construcción de un horno de crisol a gas*. Nueva York: Written & Illustrated.

Groover, P. (1997). *Fundamentos de manufactura moderna: Materiales, procesos y sistemas*.

Front Cover · Mikell P. Groover. Pearson Educación.

Hernandez Sampieri Roberto. Fernández Collado Carlos, Batista Lucio Pilar. (2018). *Metodología*

de la investigación. Mexico DF: Mc Graw - Hill.

Incropera, F., & De Witt, D. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico: Prentice

Hall.

Institut Marianao. (11 de Mayo de 2017). *Materiales refractarios*. Obtenido de

<https://materialesceramicosblog.wordpress.com/>

Maita, D. (2015). *Transferencia de calor por radiación*. Lima.

Marek, E. (2006). *Fundamental in the Production and Design of Castings*. New York.

Mestanza Barragán, Diego Fernando Lara Villegas, Viviana Patricia. (12 de Julio de 2012).

“Diseño y construcción de un horno de combustión industrial para fundir aluminio.

Riobamba, Ecuador: Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Metrogas. (29 de Octubre de 2017). *¿Qué es la Combustión?* Obtenido de

http://www.metrogas.cl/industria/asesoria_tecnica_1

Ñaupas, H., Valdivia, M. R., Palacios, J. J., & Romero, H. E. (2018). *Metodología de la*

investigación. Cuantitativa-Cualitativa y Redacción de la Tesis (5ta ed.). Ediciones de la U.

Pirobloc. (21 de Diciembre de 2016). *Formulario de transferencia de calor*. Obtenido de

<https://www.pirobloc.com/>

- Riveros, J. (2011). *Estudio de parametros para la instalacion de un horno reverbero a gas natural*. Huancayo.
- Rosero, B. (2006). *Diseño de un horno de crisol basculante para el laboratorio de fundicion del departamento de materiales*. Quito.
- Rossana, A. (11 de diciembre de 2020). *Definicion de combustion* . Obtenido de Recuperado de: [//conceptodefinition.de/combustion/](http://conceptodefinition.de/combustion/)
- Saltos, J. (2009). “Diseño y construcción de un horno de crisol basculante, calentado por combustible para la fundición de aluminio”.
- Trujillo, S. (2015). *Diseño y Construcción de un Horno de Crisol para Fundición Utilizando Gas Natural de la*. Quito: Universidad de san francisco de Quito.
- W. Trinks, M. H. Mawhinney, R. A. Shannon. (1975). *Hornos Industriales*. bilbao España: Editorial, Urmo S.A.
- Yunus, A., & Cengel, A. (2003). *Transferencia de Calor y Masa* (Vol. Vol.19). Madrid: McGraw-Hill Interamericana de España S.L.