



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

DIRECCIÓN DE POSGRADOS

**PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO
EN OPCIÓN AL GRADO ACADÉMICO DE
MAGISTER EN GESTIÓN DE ENERGÍAS**

TEMA:

Evaluación del funcionamiento técnico del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, para la mejora en la eficiencia térmica, durante el año 2015. Propuesta de reformas técnicas en el horno.

Autor: Luis Fernando Toapanta Ramos

Tutor: Ing. Enrique Torres Tamayo PhD.

LATACUNGA – ECUADOR

Enero – 2016



UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADO
Latacunga – Ecuador

APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de Miembros del Tribunal de Grado, aprueban el presente informe e Investigación de posgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Toapanta Ramos Luis Fernando, con el título de tesis: “Evaluación del funcionamiento técnico del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, para la mejora en la eficiencia térmica, durante el año 2015. Propuesta de reformas técnicas en el horno”. Han considerado las recomendaciones emitidas oportunamente y reúne los méritos suficientes para ser sometido al acto de Defensa de Tesis.

Por lo antes expuesto, se autoriza realizar los empastados correspondientes, según la normativa institucional.

Latacunga, enero 2016

Para constancia firman:

.....
MSc. Ángel León
PRESIDENTE

.....
PhD. Enrique Torres
MIEMBRO

.....
PhD. Secundino Marrero
MIEMBRO

.....
MSc. Edwin Moreano
OPONENTE

AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS

Latacunga, enero de 2016

En mi calidad de Director de la Tesis presentada por Toapanta Ramos Luis Fernando, Egresado de la Maestría en Gestión de Energías, previa a la obtención del mencionado grado académico cuyo título es “Magister en Gestión de Energías”.

Considero que dicho trabajo reúne los requisitos y méritos suficientes para ser sometido a la presentación pública y evaluación por parte del tribunal examinador.

Atentamente,

.....
Ing. Enrique Torres Tamayo PhD.

DIRECTOR DE TESIS

RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE TESIS

El contenido de la presente Tesis de Grado, es original y de mi exclusiva responsabilidad.

Atentamente

.....
Luis Fernando Toapanta Ramos
C.C. 1721113759

AGRADECIMIENTO

El presente trabajo fue realizado gracias a la participación de varias personas que me supieron apoyar en los momentos más difíciles: en primer lugar a Dios por brindarme salud a lo largo de mi vida, a mi madre Lastenia y mi padre Luis que siempre me guiaron por el camino adecuado, a mis hermanas que nunca dejaron de apoyarme, a la Universidad Técnica de Cotopaxi conjuntamente con sus docentes que engrandecieron mis conocimientos, y en especial a mi tutor el PhD. Enrique Torres que me supo guiar incondicionalmente por varios días durante la realización de este trabajo investigativo.

DEDICATORIA

El presente trabajo es dedicado a todas aquellas personas que siempre confiaron en mí, las que me dieron su apoyo moral y sabían desde un inicio que lo iba a lograr, gracias por darme su amor, confianza, estímulo y sobre todo su preocupación, de forma especial a esa persona que siempre estará en mi mente y corazón, para ti Mayra Rocío.

ÍNDICE DE GENERAL

Contenido	Página
PORTADA.....	
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO	II
AVAL DEL DIRECTOR DE TESIS	III
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE TESIS	IV
AGRADECIMIENTO.....	V
DEDICATORIA	VI
RESUMEN.....	XVI
ABSTRACT	XVII
INTRODUCCIÓN	1
Situación problemática.....	2
Justificación de la investigación.....	2
Objeto y problema de la investigación.....	3
Objeto de estudio.....	3
Formulación del problema de la investigación	3
Campo de acción y objetivo general de la investigación	4
Campo de acción.....	4
Objetivo general	4
Hipótesis de investigación.....	4
Objetivo específicos de la investigación	4
Visión epistemológica de la investigación	6
Paradigmas o enfoques epistemológicos.....	6
Nivel de investigación.....	6
Alcance de la investigación.....	7
Descripción de la estructura de los capítulos del proyecto de investigación	7

CAPÍTULO I	9
MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO SOBRE EL HORNO Y PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO	9
1.1. Caracterización detallada del objeto.....	9
1.2. Marco teórico de la investigación.....	10
1.2.1. Antecedentes de la investigación	10
1.3. Fundamentación de la investigación	13
1.4. Operacionalización de variables.....	15
1.5. Fundamentación legal.....	16
1.6. Aspectos teóricos elementales.....	17
1.6.1. Energía	17
1.6.2. Energía térmica	17
1.6.3. Transferencia de calor	18
1.6.4. Combustible y combustión.....	23
1.7. Conclusiones del capítulo.....	35
CAPÍTULO II	36
PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN EL HORNO DE CRISOL	36
2.1. Energía requerida para llevar a cabo la fusión del metal	36
2.2. Calor perdido al ambiente	38
2.3. Modelación con métodos de elementos finitos (ANSYS).....	44
2.4. Pérdidas de calor por gases de combustión.....	46
2.5. Conclusiones del capítulo.....	50

CAPÍTULO III	52
ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO EN EL HORNO TIPO CRISOL	52
3.1. Cálculo de la energía para la fusión de aluminio.....	52
3.2. Cálculo de las pérdidas de energía por transferencia de calor	54
3.2.1 Simulación del proceso de transferencia de calor con ANSYS	60
3.3. Cálculo de la pérdida de energía por gases de combustión.....	60
3.4. Cálculo de la eficiencia térmica del horno de fundición.....	65
3.5. Análisis del consumo de gas licuado de petróleo.....	66
3.6. Análisis del consumo de electricidad.....	67
3.7. Análisis ambiental del proceso de fundición	69
3.8. Conclusiones del capítulo	70
CAPÍTULO IV	71
PROPUESTA DE REFORMAS TÉCNICAS Y EXTRACCIÓN DE CALOR EN EL HORNO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO	71
4.1. Título de la propuesta.....	71
4.2. Justificación.....	71
4.3. Objetivo.....	72
4.4. Estructura de la propuesta	72
4.4.1 Mejoramiento de los parámetros operacionales.....	72
4.4.2 Diseño de una campana de extracción de calor	74
4.4.3 Análisis de intercambio de calor proveniente de los gases calientes ...	82
4.5. Valoración económica de la propuesta	86
4.5.1 Análisis de valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR) ..	87
4.6. Eficiencia térmica del proceso de fundición	90
4.7. Conclusiones del capítulo	90

CONCLUSIONES GENERALES	91
RECOMENDACIONES	92
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	93
Bibliografía citada.....	93
Bibliografía consultada	96

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla	Página
Tabla 1. 1. Matriz causa - efecto	15
Tabla 1. 2. Comparación de algunos combustibles.....	24
Tabla 1. 3. Aplicabilidad según tipo de horno	31
Tabla 2. 1. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica.....	47
Tabla 3. 1. Resultados de la energía para alcanzar la temperatura de colada.....	53
Tabla 3. 2. Resistencias térmicas en las paredes cilíndricas.	55
Tabla 3. 3. Resistencia térmica por convección en el exterior del horno.....	56
Tabla 3. 4. Resistencias térmicas en la cubierta del horno.....	57
Tabla 3. 5. Resistencias térmicas en el piso del horno.....	57
Tabla 3. 6. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación en las paredes del horno.....	58
Tabla 3. 7. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación en la cubierta del horno.	58
Tabla 3. 8. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación en el piso del horno.....	59
Tabla 3. 9. Poder calorífico del propano.	61
Tabla 3. 10. Poder calorífico del butano.	61
Tabla 3. 11. Poder calorífico del gas licuado de petróleo.	62
Tabla 3. 12. Relación aire combustible Gas licuado de petróleo.	62
Tabla 3. 13. Energías que ingresan al sistema de combustión.	63
Tabla 3. 14. Energías que salen del sistema de combustión.	64
Tabla 3. 15. Eficiencia térmica del horno de fundición.	65
Tabla 3. 16. Eficiencia térmica en hornos de fundición.....	66
Tabla 3. 17. Gasto económico por consumo de gas licuado de petróleo.	67
Tabla 3. 18. Tarifas de consumo aplicadas por la Empresa Eléctrica Quito.....	68
Tabla 3. 19. Gasto económico por consumo de electricidad.....	68
Tabla 4. 1. Distancias adecuadas de la campana de extracción.....	76
Tabla 4. 2. Velocidades mínimas de captura.....	77

Tabla 4. 3. Velocidades de transporte en los ductos.	79
Tabla 4. 4. Características técnicas de extractor axial tubular.	82
Tabla 4.5. Costo inicial de para la implementación de la propuesta.	87
Tabla 4. 6. Consumo de energía eléctrica en termo duchas.	87
Tabla 4. 7. Datos para la proyección de VAN y TIR	88
Tabla 4. 8. Valores de flujo de caja y mantenimiento por año.....	88
Tabla 4. 9. Valores de flujo de caja y mantenimiento para la operación esporádica	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura	Página
Figura 1. 1. Árbol de problemas.	14
Figura 1. 2. Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A.	19
Figura 1. 3. Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con la temperatura.	20
Figura 1. 4. Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección	21
Figura 1. 5. Proceso de combustión completa.	24
Figura 1. 6. Proceso de fundición.	26
Figura 1. 7. Proceso de fundición con molde desechable.	28
Figura 1. 8. Molde permanente o coquilla.	29
Figura 1. 9. Proceso de fundición por inyección.	30
Figura 1. 10. Colada continua. Laminado en caliente.....	31
Figura 1. 11 Horno de cubilote	32
Figura 1. 12. Horno de inducción	33
Figura 1. 13. Horno de crisol NABERTHERM.....	34
Figura 2. 1. Diagrama de transferencia de calor por las paredes del horno.....	39
Figura 3. 1 Grafica Temperatura vs. tiempo.....	53
Figura 3. 2 Gráfica Temperatura vs. calor.	54
Figura 3. 3 Gráfica de pérdidas de energía por transferencia de calor.....	59
Figura 3. 4 Simulación de la transferencia de calor.....	60
Figura 3. 5 Pérdidas de energía en el proceso de fundición de aluminio.....	65
Figura 3. 6 Sectores de consumo de gas licuado de petróleo.....	66
Figura 4. 1. Implantación del Laboratorio de Fundición.....	73
Figura 4. 2. Ubicación actual del horno de fundición de aluminio.....	74
Figura 4. 3 Distancias referenciales de la campana de extracción tipo pabellón.	76
Figura 4. 4. Sistema de extracción de gases.....	80
Figura 4. 5 Intercambiador de flujo cruzado.....	83
Figura 4. 6. Recuperación de energía en el intercambiador de calor.	85

Figura 4. 7. Porcentaje de recuperación de energía por el intercambiador.....	86
Figura 4. 8. Tasa interna de retorno.	88
Figura 4. 9. Tasa interna de retorno para una operación esporádica.....	89

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo	Página
Anexo 1. Operacionalización de las variables	100
Anexo 2. Poder calorífico de combustibles.	102
Anexo 3. Recomendaciones y transporte del crisol.	103
Anexo 4. Propiedades de metales sólidos.	104
Anexo 5. Propiedades de metales, calor latente de fusión y vaporización	105
Anexo 6. Propiedades de diversos materiales.....	106
Anexo 7. Materiales y sistemas de aislamiento	107
Anexo 8. Propiedades del aire	108
Anexo 9. Emisividades de las superficies.....	109
Anexo 10. Propiedades de combustibles e hidrocarburos comunes	110
Anexo 11. Tabla de entalpia de formación.	111
Anexo 12. Tarifas de consumo de electricidad.	112
Anexo 13. Clasificación de colores que transportan fluidos.....	113
Anexo 14. Coeficientes de fricción en campanas de extracción.....	114
Anexo 15. Pérdida de carga por rozamiento de aire	115
Anexo 16. Presión dinámica de aire en función de su velocidad.....	116
Anexo 17. Coeficientes de pérdidas de carga en codos.	117
Anexo 18. Campanas de extracción provenientes de hornos de fundición.....	118
Anexo 19. Características técnicas del extractor tubo axial.	119
Anexo 20. Propiedades del agua saturada.....	120
Anexo 21. Fórmulas para el cálculo del caudal en campanas simples.	121

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: Evaluación del funcionamiento técnico del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, para la mejora en la eficiencia térmica, durante el año 2015. Propuesta de reformas técnicas en el horno.

AUTOR: TOAPANTA RAMOS Luis Fernando

TUTOR: PhD. TORRES TAMAYO Enrique

RESUMEN

En el presente trabajo se realiza un análisis teórico y experimental de la eficiencia térmica del horno de fundición tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, con la finalidad de mejorar esta eficiencia térmica a base de establecer el mejoramiento de los parámetros operacionales del horno, proponiendo un diseño de extracción de gases calientes e intercambiando esta energía mediante un intercambiador de flujo cruzado. Las pérdidas de calor se deben a la transferencia de calor por conducción, convección y radiación por medio de las paredes cilíndricas del horno de fundición, estas pérdidas se logran disminuir cubriendo al horno de manera parcial. La revisión bibliográfica, indica el alcance de los trabajos realizados alrededor del planeta, sobre la metodología para determinar la eficiencia térmica en hornos tipo crisol. Se parte del estudio de la cantidad de energía necesaria para fundir 45 kg de aluminio, así como la determinación de las pérdidas de energía por las paredes del horno de fundición y por el proceso de combustión. Se analiza el costo económico que genera la realización de cada práctica en el interior del laboratorio. Por otro lado se propone el aumento de la eficiencia del proceso de fundición a través de mejorar los parámetros operacionales, diseño de una campana de extracción de gases calientes y el intercambio de calor hacia otro proceso. Al final de la investigación se analiza de forma económica si la propuesta es viable o no para su implementación.

Descriptor: horno de fundición, energía, combustión, eficiencia térmica.

UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI
UNIDAD DE POSGRADOS
MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍAS

TÍTULO: Evaluación del funcionamiento técnico del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, para la mejora en la eficiencia térmica, durante el año 2015. Propuesta de reformas técnicas en el horno.

AUTOR: TOAPANTA RAMOS Luis Fernando

TUTOR: PhD. TORRES TAMAYO Enrique

ABSTRACT

In this work a theoretical and experimental analysis of the thermal efficiency of the smelting furnace type crucible of the Salesiana Polytechnic University, in order to improve the thermal efficiency based on improving establish operating parameters of the furnace , is done by proposing a design extracting hot gases and exchanging this energy using a cross flow exchanger. The heat losses due to heat transfer by conduction, convection and radiation through the cylindrical walls of the furnace, these losses are achieved lower covering partially baked. The literature review indicates the scope of the work carried out around the planet, on the methodology to determine the thermal efficiency crucible type furnace. This part of the study the amount of energy needed to melt 45 kg of aluminum, as well as determining power losses by the walls of the furnace and by the combustion process. The economic costs generated by the implementation of each practice within the laboratory analyzes. Furthermore the increased efficiency of the melting process through improving the operational parameters, design of a fume hood of hot gases and heat exchange to another process is proposed. At the end of the investigation it analyzed economically if the proposal is viable or not to implement it.

Descriptors: smelting furnace, energy, combustion, thermal efficiency.

INTRODUCCIÓN

El uso de combustibles fósiles hoy en día es una de las principales causantes de la contaminación ambiental, sin embargo la utilización de este tipo de combustible es fundamental para el funcionamiento de varias máquinas y equipos industriales, es por estas razones; que es imperativo, el obtener la mayor cantidad de energía utilizando la menor proporción del portador energético. En la actualidad en el Ecuador se están planteando varias estrategias de gestionar el uso de la energía, tanto es así, que el gobierno central está proyectando el cambio de la matriz productiva y por ende el cambio de la matriz energética, lo que ayudará a la reducción de la contaminación ambiental.

La evaluación de los parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana y su posterior estudio energético - térmico es una investigación que se puede realizar en el Ecuador, con la finalidad de aumentar la eficiencia térmica, así como, reducir el impacto ambiental y el uso desmesurado de combustibles fósiles. Durante la investigación se analiza el consumo de energía eléctrica, gas licuado de petróleo, eficiencia térmica en el proceso de fundición de aluminio tipo crisol en el Laboratorio de fundición de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy, durante el año 2015.

Situación problemática

El excesivo consumo de combustibles fósiles está cambiando radicalmente el modelo económico, energético y sobre todo la forma de vida en el Ecuador. El consumo actual provoca que en cierto momento la generación de electricidad sea insuficiente para la demanda que requieren las empresas y la población por lo que es necesario, consumir de manera adecuada estos recursos. Los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, cuenta con algunos equipos que necesitan recursos energéticos tales como: gas licuado de petróleo y energía eléctrica, lo que provoca gasto de dinero en el momento de su utilización y su mantenimiento.

Los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, desde su instauración, han adquirido gran cantidad de equipos de aprendizaje e investigación, siendo uno de ellos el horno de fundición de aluminio tipo crisol, lo que es un beneficio para los estudiantes de la carrera, sin embargo este equipo fue instalado y está funcionando sin ninguna forma adecuada de utilización de los recursos energéticos y parámetros operacionales; tales como: la disposición física del lugar donde está establecido el horno, que no la adecuada para un equipo de esta índole, grandes pérdidas térmicas provocadas durante el proceso de fundición el que puede ser utilizado para otros procesos o para un proceso anterior al de la fundición, exceso de consumo de energía eléctrica y gas licuado de petróleo que ocasiona pérdidas económicas.

Al continuar utilizando gas licuado de petróleo y energía eléctrica de la manera actual en el proceso de fundición de aluminio, en lugar de establecer parámetros de operación; se puede suscitar por varios motivos los que están relacionados con la falta de tecnología, el elevado costo para implementar mejoras sustanciales, así como también la escasa investigación del proceso térmico interno del horno.

Justificación de la investigación

Una de las necesidades más apremiantes en la vida útil de cualquier equipo que trabaje con altas temperaturas es la eficiencia térmica que posee, así como reducir

en gran parte la cantidad de pérdidas provocadas durante el proceso de funcionamiento.

El interés científico de la presente investigación, se basa en la importancia de estudiar los parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, y así disminuir el consumo de los portadores energéticos principales como: la energía eléctrica y el gas licuado de petróleo, con lo que es posible la mejora de la eficiencia térmica total del proceso de fundición de aluminio, así como, reducir la contaminación ambiental.

Luego de haber mejorado la eficiencia térmica del horno de fundición los principales beneficiarios de esta investigación serán: los directivos de la universidad, docentes, laboratoristas y estudiantes así como también los estudiantes que son los usuarios directos en la utilización del Laboratorio de Fundición.

Al establecer las reformas técnicas en el equipo se puede alcanzar una certificación nacional; en el uso de este tipo de dispositivos que trabajan a altas temperaturas.

Objeto y problema de la investigación

Objeto de estudio

- ✓ Horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy.

Formulación del problema de la investigación

- ✓ ¿Cómo inciden los parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, en la eficiencia térmica, durante el año 2015?

Campo de acción y objetivo general de la investigación

Campo de acción

- ✓ Eficiencia térmica en el horno de fundición tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy.

Objetivo general

- ✓ Evaluar los parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy, y su influencia para la mejora en la eficiencia térmica del mismo.

Hipótesis de investigación

- ✓ El conocimiento de los parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, permitirá: disminuir las pérdidas de calor e incrementar la eficiencia del mismo.

Objetivo específicos de la investigación

- ✓ Analizar el estado del arte de los diferentes tipos de hornos de fundición de aluminio y su relación con el objeto de estudio.
- ✓ Simular las pérdidas de calor provocadas desde el interior del horno de fundición de aluminio y su influencia en la eficiencia térmica.
- ✓ Determinar la eficiencia térmica actual del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito.
- ✓ Valorar de forma técnica, económica y ambiental la operación del horno de fundición de aluminio.

Sistema de tareas por objetivos específicos

Para la adecuada ejecución del proyecto de investigación, a continuación, se detalla de manera explícita cada objetivo específico y se enumeran las acciones que se van a realizar por cada uno de ellos.

1. Analizar el estado del arte de los diferentes tipos de hornos de fundición de aluminio y su relación con el objeto de estudio.
 - a. Efectuar una búsqueda íntegra acerca de las diferentes investigaciones relacionadas con el proceso de fundición de aluminio, para esto se utiliza la técnica de la observación.
 - b. Examinar cada uno de los resúmenes de los artículos científicos así como determinar la parte esencial de ellos, con la finalidad de poseer una idea bien definida de las investigaciones realizadas en el planeta con relación al objeto de estudio.

2. Simular las pérdidas de calor provocadas desde el interior del horno de fundición de aluminio y su influencia la eficiencia térmica.
 - a. Simular la distribución de temperatura proveniente del interior del horno de fundición, y su influencia en los espacios críticos; donde se produce la mayor pérdida de energía térmica, mediante la simulación en programas especializados.
 - b. Analizar los valores otorgados por el software de simulación, para mejorar los parámetros operacionales que contribuirán en el aumento porcentual en la eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio.

3. Determinar la eficiencia térmica actual del horno de fundición de aluminio de los laboratorios de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito.
 - a. Investigar acerca de los problemas que posee el horno de fundición de aluminio, para que junto con los operadores del mismo, se planifiquen estrategias que mejoren la eficiencia térmica y así minimizar pérdidas económicas por la utilización de recursos energéticos.
 - b. Establecer la eficiencia térmica actual del horno de fundición de aluminio mediante fórmulas y ecuaciones de balance de masa y energía, estos parámetros bajo la técnica de la medición y el cálculo.

- c. Comparar la eficiencia térmica calculada anteriormente con el máximo rendimiento al mejorar los parámetros operacionales del horno de fundición.
 - d. Demandar información al jefe de área de laboratorios acerca de los valores cancelados, por consumo de energía eléctrica y de gas licuado de petróleo, por lo tanto determinar el costo que genera el proceso de fundición de aluminio.
4. Valorar de forma técnica, económica y ambiental de la operación del horno de fundición de aluminio.
- a. Realizar una valoración técnica y ambiental acerca del mejoramiento en la calidad del proceso de fundición de aluminio.
 - b. Elaborar una estimación de forma económica, de la rentabilidad de tener un sistema de extracción de gases calientes provenientes del proceso de fundición de aluminio en la Universidad Politécnica Salesiana.

Visión epistemológica de la investigación

Paradigmas o enfoques epistemológicos

En el desarrollo de esta investigación es necesario utilizar un enfoque cualitativo y cuantitativo, ya que en el instante de analizar los resultados, se va a realizar una comparación entre la eficiencia térmica actual del horno de fundición de aluminio y la eficiencia térmica luego de haber modificado los parámetros operacionales.

Nivel de investigación

El tipo de investigación que se llevará es una investigación explicativa, (Arias, 2006) asegura que: La investigación explicativa se encarga de buscar el porqué de los hechos mediante el establecimiento de relaciones causa-efecto. En este sentido,

los estudios explicativos pueden ocuparse tanto de la determinación de las causas (investigación post facto), como los efectos (investigación experimental), mediante la prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos.

Alcance de la investigación

En esta investigación se llevará a cabo la evaluación, análisis y mejora de los parámetros operacionales que influyen en la eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy.

Descripción de la estructura de los capítulos del proyecto de investigación

La investigación está dividida en cuatro capítulos, en los que se ejecutan diferentes actividades; con la finalidad de alcanzar la totalidad de la investigación, que tiene por objetivo la evaluación de los parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio para el aumento de la eficiencia térmica.

En el capítulo uno se van a exponer los antecedentes de la investigación y la fundamentación legal que ampara la misma, tomando en cuenta que el gobierno central promueve el Plan Nacional del Buen Vivir 2013 – 2017, el que contiene artículos que promueven el derecho de la población a vivir en un ambiente sano. Además se analizará el estado del arte con relación a los hornos de fundición de aluminio, simulación numérica, proceso de fundición y combustión.

En el capítulo dos se elabora una descripción de la metodología a usar en la investigación. La que consta de varias etapas de trabajo que incluyen la búsqueda de información, el análisis de la metodología, tipo de investigación y las técnicas e instrumentos utilizados; en el cálculo de la eficiencia térmica, balances de energía y masa, simulación y análisis económico que es necesario a lo largo del desarrollo investigativo.

El análisis e interpretación de resultados se presenta en el capítulo tres. En el que se va a simular, calcular y analizar el proceso de fundición de aluminio con base en

el desarrollo de balances de energía y masa, modelación en software especializados, además obtener el consumo total de los portadores energéticos.

La reforma de los parámetros operacionales constituye la propuesta de esta investigación, la que se expondrá en el capítulo cuatro, el diseño de un sistema de extracción de gases calientes provenientes del horno de fundición y la utilización de esta energía térmica se detallan en este capítulo.

CAPÍTULO I

MARCO CONTEXTUAL Y TEÓRICO SOBRE EL HORNO Y PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO

El elaborar el marco teórico no es sólo hacer una revisión o reseña de lo que se ha hecho antes con títulos semejantes, sino de insertarse de manera real y profunda en la actividad científica con el fin de encontrar el sentido de la investigación que se quiere hacer (Rivera-García, 2013). El objetivo del actual capítulo es establecer los fundamentos teóricos imperiosos para la evaluación de la eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, a partir del procesamiento de datos del conocimiento científico y técnico establecido en trabajos anteriores.

1.1. Caracterización detallada del objeto

El proceso de fundición de aluminio en el Laboratorio de Fundición que está ubicado en la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy, desde el año 2013, es una actividad novedosa para los estudiantes de la carrera de Ingeniería Mecánica, por el motivo de que el estudiante no tiene que salir de la institución para visualizar este proceso, sin embargo el actual modo de uso del horno de fundición está ocasionando varios contratiempos tanto para directivos como a los usuarios del mismo, adversidades como: soportar extremas temperaturas, hedores y sonidos que se producen durante cada práctica de fundición, ante estas contrariedades y otras más, es imperativo hacer un análisis de los parámetros operacionales con la finalidad de aumentar la eficiencia térmica del horno y evitar pérdidas económicas provocadas por el consumo de energía eléctrica y gas licuado de petróleo, y también reducir la contaminación ambiental.

1.2. Marco teórico de la investigación

1.2.1. Antecedentes de la investigación

(Cabañas, 2013), aduce que, en cuanto al tratamiento del aluminio se ha visto cómo se ha ido pasando de compuestos en polvo a granulados, cómo se ha mejorado la eficiencia del desgasificado con nuevos diseños de máquinas y de rotores empleando para ello la simulación por ordenador. Se han desarrollado equipos capaces de medir el contenido de hidrógeno en el baño. Finalmente asegura que en estos momentos se está trabajando en el desarrollo de machos de sales solubles en agua para poder aumentar el rango de piezas que se pueden fabricar en alta presión y grandes series.

(Fundidores, 2013), afirma que, la recuperación de gases es posible mediante la recuperación específica del calor generado por el proceso de fusión con el fin de precalentar el material que va a ser fundido. Para ello, los hornos de fusión StrikoMelter cuentan con una geometría especial de la cuba que combina las fases de fusión del precalentamiento, calentamiento y fusión en una única cuba. Este principio efectivo de la recuperación térmica integrada reduce los requisitos de energía del proceso de fusión definitivo, consiguiendo un ahorro considerable de combustible; además el rápido proceso de fusión en esta zona reduce la pérdida de metal debido a la oxidación. Los hornos de fusión StrikoMelter consiguen un rendimiento del material de un 99,7%.

(Fein, 2013), determina que, hoy en día, todas las modernas fundiciones usan alguno de los sistemas de arena aglomerada químicamente, ya que se encuentran bajo una creciente presión para reducir sus costes de fabricación, reducir su impacto al medioambiente, pero al mismo tiempo, mejorar la calidad de la fundición. Una de las maneras de cumplir con estos requisitos es invertir en la recuperación de las arenas. Aunque la mayoría de las fundiciones ya tienen recuperadoras mecánicas, muchos están tratando de reducir aún más los costes e invertir en la recuperación térmica de las mismas, en definitiva considera que, la recuperación térmica ha existido desde hace muchos años, pero ahora se ha llegado a un punto en que es

rentable, económica, fiable y por lo tanto viable para que lo tengan en consideración la mayoría de las fundiciones.

(Arrieta-Cadavid, 2013), aseguran que; los procesos de alta temperatura ($600^{\circ}\text{C} < T < 1500^{\circ}\text{C}$) son intensivos en consumo de calor y la calidad de la combustión de los combustibles usados tiene implicaciones importantes en la calidad de los productos, la productividad, la salud ocupacional y las emisiones contaminantes.

En relación con el diagnóstico tecnológico de los sistemas de combustión y calentamiento en empresas con procesos de alta temperatura, se sabe que, en general, tienen los siguientes problemas:

- ✓ Los equipos de combustión tienen un grado de obsolescencia muy grande y de baja eficiencia térmica.
- ✓ Los materiales con que están fabricados los hornos, no son los que actualmente se están utilizando en los equipos de nueva generación, pues estos tienen baja conductividad térmica y baja inercia térmica.
- ✓ En general son equipos cuyos sistemas de combustión no regulan la relación aire/combustible y en muchos casos no se registran las temperaturas de proceso en línea.
- ✓ Las condiciones de salud ocupacional no son las más adecuadas: altas temperaturas de las paredes externas de los hornos y por tanto de los sitios de trabajo por mal aislamiento y fugas de calor, inmisión de material particulado por los operarios y altos niveles de ruido.
- ✓ Inadecuados sistemas de evacuación de humos los cuales generan condiciones extremas de alta temperatura y recirculación de productos de combustión en los recintos.
- ✓ La obsolescencia tecnológica combinada, en muchos casos, con la mala calidad de los combustibles usados genera índices de emisiones contaminantes muy altas tanto gaseosas, como de material particulado.

Concluye que, la solución a la problemática anteriormente descrita en este sector requiere de la utilización de tecnologías de combustión y calentamiento de nueva generación con alta eficiencia térmica, complementada con la utilización de

combustibles limpios, con propiedades de combustión que contribuyan a mejorar la productividad de los procesos, la salud ocupacional y la disminución de emisiones contaminantes, además añade que; el gas natural es un combustible con el cual se pueden conseguir estos objetivos.

(Aristizábal, 2006), confirma que, desde la aparición del horno de cubilote se han realizado un sinnúmero de mejoras y modificaciones; se pueden mencionar: la utilización de dos filas de toberas, el enriquecimiento del soplo con oxígeno, el precalentamiento del aire utilizado para la combustión, el control de las emisiones atmosféricas contaminantes y en los últimos tiempos la formulación de modelos matemáticos que permiten simular su operación. Estos modelos se clasifican en estadísticos y termoquímicos. Además asevera que, los modelos termoquímicos se basan en el planteamiento de las ecuaciones matemáticas que rigen los fenómenos que ocurren en el interior del horno de cubilote, utilizando como herramientas principales las leyes de transferencia de calor, transferencia de masa, cinética química y termodinámica. La ventaja principal de este tipo de modelos es que, además de que permiten realizar simulaciones de la operación, están en capacidad de adaptarse a cualquier unidad de fusión, ya que su construcción está basada en los fenómenos más importantes en el sistema, además permiten formarse conceptos de lo que ocurre durante la operación.

(Malpohl-Hillen, 2010), define que, las ventajas de los hornos de crisol son el manejo y mantenimiento sencillo, así como los reducidos costos de inversión. Con este concepto, la empresa de fundición puede asimismo fundir cargas pequeñas con aleaciones distintas. Prácticamente no existen restricciones en lo referido a aleaciones. La colada se puede tratar directamente en el crisol y, de ser necesario, se la puede cambiar en forma fácil y rápida. Los hornos de crisol empleados en empresas de fundición a presión de aluminio como agregado de fusión poseen en general una capacidad de hasta 1.000 kg, con dispositivo de vuelco también hasta de 1.500 kg. Los volúmenes de colada alcanzan hasta unos 250 kg Al/h con calentamiento eléctrico y hasta unos 400 kg Al/h con un modelo de calentamiento a combustible, al finalizar concluye que, los hornos de crisol no se justifican para cantidades elevadas de producción. Los motivos principales son el alto consumo de

energía y la operación manual. El cargado a mano ocasiona gastos laborales importantes. Además, sólo se debe recargar metal seco; el metal húmedo puede producir expulsiones, de alto riesgo para el personal.

(Balsero-Quintero, 2012), deducen que, en el análisis térmico realizado en ANSYS se determinó la distribución de temperaturas en las paredes y el flujo de calor a través de las mismas, para lo cual fue necesario hacer un modelo del horno en SolidWorks y posteriormente importarlo a la interfaz de trabajo de ANSYS workbench, y finalizan aclarando que, el horno fue simulado térmicamente bajo las siguientes condiciones:

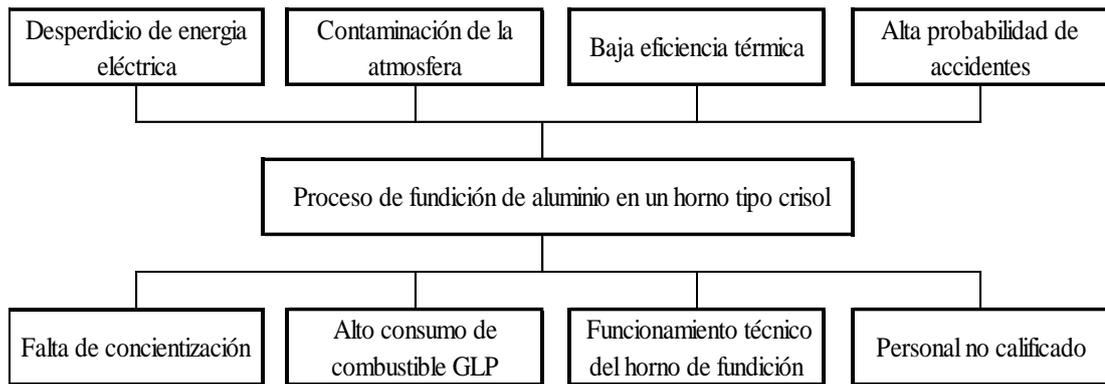
- ✓ Las caras que funcionan como soporte no presentan transferencia de calor.
- ✓ La temperatura ambiente tenida en cuenta en el análisis es de 25°C.
- ✓ La temperatura en las paredes internas del horno es constante y se supone es la temperatura máxima de funcionamiento del horno 1500°C.
- ✓ Se tiene en cuenta la transferencia de calor por conducción a través de las paredes del horno y la convección en estado natural de las paredes externas del horno.

En estos días alrededor del mundo se han elaborado incontables investigaciones relacionadas con el proceso de fundición, modelación y simulación numérica, algunos de ellos fueron referenciados con anterioridad. Sin embargo, estas investigaciones carecen de un análisis energético y termodinámico del proceso de fundición de aluminio en el interior de un centro de enseñanza universitaria.

1.3. Fundamentación de la investigación

Al continuar utilizando el horno de fundición de aluminio tipo crisol de la manera actual en lugar de hacer reformas en los parámetros operacionales, se está restringiendo la eficiencia térmica del mismo, conjuntamente se aumenta la contaminación ambiental por el uso de combustibles fósiles. En la figura 1.1 se observa un árbol de problemas con las causas y efectos que se encuadran en la investigación.

EFFECTOS



CAUSAS

Figura 1. 1. Árbol de problemas.

A continuación se detallan las causas que se determinaron para el desarrollo de la investigación:

- ✓ La falta de concientización en la utilización de la energía eléctrica durante el proceso de fundición de aluminio.
- ✓ El alto consumo de combustibles fósiles, como el gas licuado de petróleo debido al deplorable uso de este portador energético en el horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana.
- ✓ Existe insuficiente conocimiento del funcionamiento técnico y los parámetros operacionales propios del horno de fundición, siendo uno de ellos una campana de extracción de gases calientes.
- ✓ La ausencia de capacitación en el personal que opera y ofrece mantenimiento al horno de fundición de aluminio, así como la no utilización de ropa de protección adecuada.

Las causas citadas precedentemente ocasionan varios efectos, los que se detallan a continuación:

- ✓ El desperdicio de energía eléctrica ocasiona el despilfarro de dinero en las facturas, de este portador energético, debido a que se necesita más energía para alcanzar la temperatura de fusión.
- ✓ La contaminación ambiental es provocada por el uso de combustibles fósiles, y que al no tener un tratamiento de los gases de combustión ocasiona

que estos se mezclen en el ambiente provocando graves enfermedades respiratorias.

- ✓ La eficiencia térmica se encuentra mermada debido a varios factores, como los parámetros operacionales, mantenimiento, combustión, extracción de gases calientes y la colocación del horno de fundición estimulan esta disminución en la eficiencia.
- ✓ El no poseer personal calificado en el manejo del horno de fundición de aluminio podría ocasionar graves accidentes como quemaduras, amputaciones e incluso pérdida de vidas en los beneficiarios directos; estudiantes de la Universidad Politécnica Salesiana.

Las causas y efectos expuestos anteriormente establecen de forma directa las variables independientes y dependientes, respectivamente.

La causa primordial que lleva a cabo el desarrollo investigativo es el funcionamiento técnico del horno de fundición de aluminio tipo crisol, y por lo que se expuso con anterioridad, el mismo no se encuentra funcionando de la manera más adecuada posible, ocasionando la disminución en la eficiencia térmica, por lo consiguiente se determinaron las siguientes variables para el progreso del proyecto:

Tabla 1. 1. Matriz causa - efecto

Causa	Variable independiente	Parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio.
Efecto	Variable dependiente	Eficiencia térmica.

1.4. Operacionalización de variables

La operacionalización de las variables independiente como dependiente; por ser tablas extensas en tamaño se encuentran en el Anexo 1.

1.5. Fundamentación legal

En la Constitución de la República del Ecuador aprobada en 2008 y en el Instituto Ecuatoriano de Normalización, existen leyes y reglamentos que resguardan el medio ambiente y la conservación de la energía, así como; el adecuado uso de los reglamentos establecidos.

CONSTITUCIÓN DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR, TITULO II: DERECHOS, CAPITULO SEGUNDO, DERECHOS DEL BUEN VIVIR

Art. 14.- Se reconoce el derecho de la población a vivir en un ambiente sano y ecológicamente equilibrado, que garantice la sostenibilidad y el buen vivir, *sumak-kawsay*.

Se declara de interés público la preservación del ambiente, la conservación de los ecosistemas, la biodiversidad y la integridad del patrimonio genético del país, la prevención del daño ambiental y la recuperación de los espacios naturales degradados (Asamblea Constituyente, 2008).

CONSTITUCIÓN DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR, TÍTULO VII, RÉGIMEN DEL BUEN VIVIR, CAPÍTULO SEGUNDO BIODIVERSIDAD Y RECURSOS NATURALES, SECCIÓN SÉPTIMA BIOSFERA, ECOLOGÍA URBANA Y ENERGÍAS ALTERNATIVAS

Art. 413.- El Estado promoverá la eficiencia energética, el desarrollo y uso de prácticas y tecnologías ambientalmente limpias y sanas, así como de energías renovables, diversificadas, de bajo impacto y que no pongan en riesgo la soberanía alimentaria, el equilibrio ecológico de los ecosistemas ni el derecho al agua.

Art. 414.- El Estado adoptará medidas adecuadas y transversales para la mitigación del cambio climático, mediante la limitación de las emisiones de gases de efecto invernadero, de la deforestación y de la contaminación atmosférica; tomará medidas para la conservación de los bosques y la vegetación, y protegerá a la población en riesgo (Asamblea Constituyente, 2008).

NTE INEN-ISO 20349 EQUIPO DE PROTECCIÓN PERSONAL. CALZADO DE PROTECCIÓN FRENTE A RIESGOS TÉRMICOS Y SALPICADURAS DE METAL FUNDIDO COMO LOS QUE SE ENCUENTRAN EN FUNDICIONES Y SOLDADURA

Esta norma internacional especifica los requisitos y métodos de ensayo del calzado que protege a los usuarios de los riesgos térmicos y de las salpicaduras de hierro y aluminio fundido como los que se encuentran en fundiciones, soldadura y procesos afines.

El calzado que cumple con esta norma internacional también ofrece otra protección como se define en la Norma ISO 20345.

1.6. Aspectos teóricos elementales

1.6.1. Energía

(Cengel-Boles, 2008), define a la energía como la ciencia de la *energía*. Aunque todo mundo tiene idea de lo que es la energía, es difícil definirla de forma precisa. La energía se puede considerar como la capacidad para causar cambios. Una de las más importantes y fundamentales leyes de la naturaleza es el **principio de conservación de la energía**. Éste expresa que durante una interacción, la energía puede cambiar de una forma a otra pero su cantidad total permanece constante. Es decir, la energía no se crea ni se destruye solo se transforma.

En la vida diaria es común llamar calor a las formas sensible y latente de la energía interna, y se habla acerca del calor que los cuerpos contienen. Sin embargo, en termodinámica, normalmente se hace referencia a esas formas de energía como energía térmica para evitar cualquier confusión con la transferencia de calor (Cengel-Boles, 2008).

1.6.2. Energía térmica

(Incropera-DeWitt, 1999), define que, la energía que se transfiere es la energía sensible o energía térmica interna del fluido. Sin embargo, hay procesos de

convección en los que existe, además, intercambio de calor latente. Éste generalmente se asocia con un cambio de fase entre los estados líquido y vapor del fluido. Dos casos especiales de interés son la ebullición y la condensación.

Además comenta que, en la visión moderna de los materiales, un sólido se compone de electrones libres y de átomos unidos en un arreglo periódico denominado estructura cristalina. Por consiguiente, el transporte de energía térmica se debe a dos efectos: la migración de electrones libres y las ondas vibracionales de la estructura cristalina. Estos efectos son aditivos, de modo que la conductividad térmica es la suma del componente electrónico y el componente de la estructura cristalina. Así mismo aduce, como el espacio intermolecular es mucho mayor y el movimiento de las moléculas es más aleatorio para el estado líquido y gaseoso que para el sólido, el transporte de energía térmica es menos efectivo. La conductividad térmica de los gases y líquidos es por tanto menor que la de los sólidos en general.

1.6.3. Transferencia de calor

(Cengel, 2007), manifiesta que; la termodinámica trata de la cantidad de transferencia de calor a medida que un sistema pasa por un proceso de un estado de equilibrio a otro y no hace referencia a cuánto durará ese proceso. Pero en la ingeniería a menudo interesa la rapidez o razón de esa transferencia, la cual constituye el tema de la ciencia de la transferencia de calor.

(Holman, 1999), afirma que; la transferencia de calor es la ciencia que trata de predecir el intercambio de energía que puede tener lugar entre cuerpos materiales, como resultado de una diferencia de temperatura. La termodinámica enseña que esta transferencia de energía se define como calor. La ciencia de la transferencia de calor pretende no sólo explicar cómo la energía térmica puede ser transferida, sino también predecir la rapidez con la que, bajo ciertas condiciones específicas, tendrá lugar esa transferencia. El hecho de que el objetivo deseado del análisis sea la rapidez de la transferencia del calor, señala la diferencia entre la transferencia de calor y la termodinámica.

A continuación, se presentan los tres mecanismos básicos de la transferencia de calor: la conducción, convección y radiación.

1.6.3.1. Transferencia de calor por conducción

(Holman, 1999), enuncia que, cuando en un cuerpo existe un gradiente de temperatura, la experiencia muestra que hay una transferencia de energía desde la región a alta temperatura hacia la región de baja temperatura. Se dice que la energía se ha transferido por conducción y que el flujo de calor por unidad de área es proporcional al gradiente normal de temperatura.

$$\dot{Q}_{\text{cond}} = k \cdot A \cdot \left(\frac{T_1 - T_2}{\Delta_x} \right) \quad (\text{Ecu. 1.1})$$

Donde:

\dot{Q}_{cond} : razón de transferencia de calor, (W)

k: conductividad térmica, (W/m · °C)

A: área, (m²)

T₁: temperatura inicial, (°C)

T₂: temperatura final, (°C)

Δ_x : espesor de pared, (m)

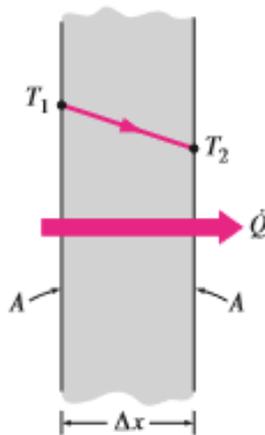


Figura 1. 2. Conducción de calor a través de una pared plana grande de espesor Δx y área A.

Fuente: (Cengel, 2007)

(Cengel, 2007), considera que la conducción de estado estacionario de calor a través de una pared plana grande de espesor $\Delta_x = L$ y área A, como se muestra en la

figura 1.2. La diferencia de temperatura de uno a otro lado de la pared es $\Delta T = T_2 - T_1$. Los experimentos han demostrado que la razón de la transferencia de calor, Q , a través de la pared se duplica cuando se duplica la diferencia de temperatura ΔT de uno a otro lado de ella, o bien, se duplica el área A perpendicular a la dirección de la transferencia de calor; pero se reduce a la mitad cuando se duplica el espesor L de la pared. Por tanto, se concluye que la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa.

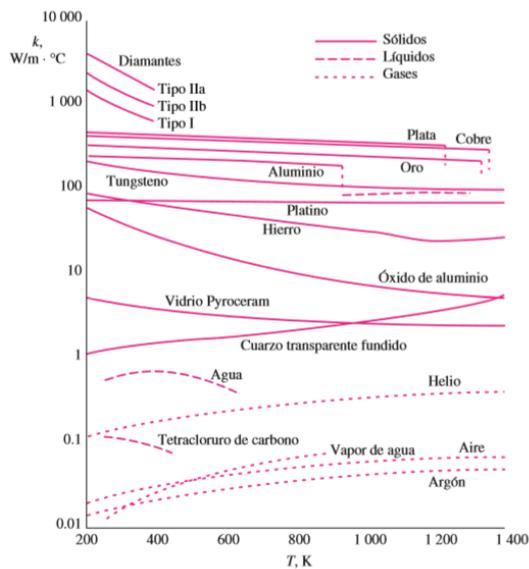


Figura 1. 3. Variación de la conductividad térmica de diversos sólidos, líquidos y gases con la temperatura.

Fuente: (Cengel, 2007)

Por lo tanto la conductividad térmica de un material se puede definir como la razón de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura. La conductividad térmica de un material es una medida de la capacidad del material para conducir calor. Un valor elevado para la conductividad térmica indica que el material es un buen conductor del calor y un valor bajo indica que es un mal conductor o que es un aislante. Además enuncia, que los metales puros tienen altas conductividades térmicas y se pensaría que las aleaciones metálicas también deben tener altas conductividades. Se esperaría que una aleación de dos metales con conductividades térmicas k_1 y k_2

tenga una conductividad k entre k_1 y k_2 . Pero no es así. La conductividad térmica de una aleación de dos metales suele ser mucho más baja que la de cualquiera de ellos (Cengel-Boles, 2008).

1.6.3.2. Transferencia de calor por convección

(Incropera-DeWitt, 1999), conceptualiza que; el modo de transferencia de calor por convección se compone de dos mecanismos. Además de la transferencia de energía debida al movimiento molecular aleatorio (difusión), la energía también se transfiere mediante el movimiento global, o macroscópico del fluido. El movimiento del fluido se asocia con el hecho de que, en cualquier instante, grandes números de moléculas se mueven de forma colectiva o como agregados. Tal movimiento, en presencia de un gradiente de temperatura, contribuye a la transferencia de calor. Como las moléculas en el agregado mantienen su movimiento aleatorio, la transferencia total de calor se debe entonces a una superposición de transporte de energía por el movimiento aleatorio de las moléculas y por el movimiento global del fluido. Por ultimo concluye que; la transferencia de calor por convección ocurre entre un fluido en movimiento y una superficie limitante cuando éstos tienen diferentes temperaturas.

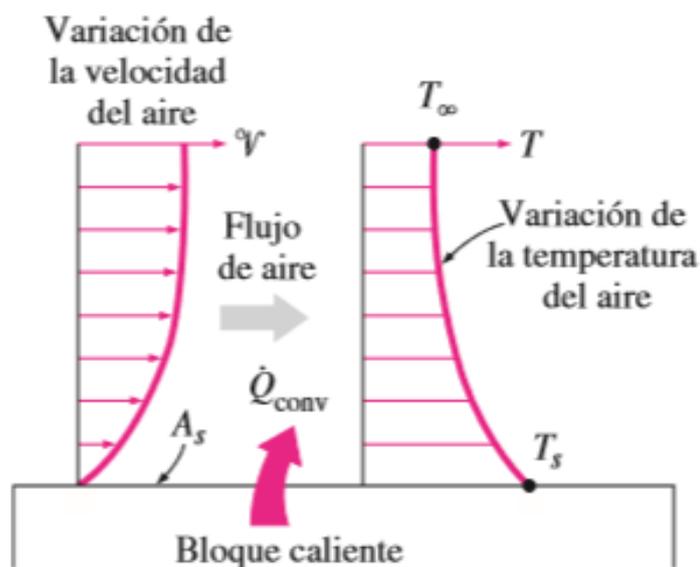


Figura 1. 4. Transferencia de calor de una superficie caliente hacia el aire por convección

Fuente: (Cengel, 2007)

(Cengel, 2007), afirma que; la convección recibe el nombre de convección forzada si el fluido es forzado a fluir sobre la superficie mediante medios externos como un ventilador, una bomba. Como contraste, se dice que es convección natural (o libre) si el movimiento del fluido es causado por las fuerzas de empuje que son inducidas por las diferencias de densidad debidas a la variación de la temperatura en ese fluido.

(Cengel, 2007), aclara que; a pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento como:

$$\dot{Q}_{\text{conv}} = h \cdot A_s \cdot (T_s - T_{\infty}) \quad (\text{Ecu. 1.2})$$

Donde:

\dot{Q}_{conv} : razón de transferencia de calor por convección, (W)

h : coeficiente de transferencia por convección, (W/m² °C)

A_s : área superficial, (m²)

T_s : temperatura de superficie, (°C).

T_{∞} : temperatura de flujo libre, (°C).

(Cengel, 2007), afirma que; el coeficiente de transferencia de calor por convección “ h ” no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo.

1.6.3.3. Transferencia de calor por radiación

(Incropera-DeWitt, 1999), define que, la radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Aunque se centra la atención en la radiación de superficies sólidas, esta radiación también puede provenir de

líquidos y gases. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivas. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente, fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa.

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4) \quad (\text{Ecu. 1.3})$$

Donde:

\dot{Q}_{rad} : razón de transferencia de calor transferido por radiación, W

ε : emisividad de la superficie, (adimensional)

σ : constante de Stefan-Boltzman, ($5,67 \cdot 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}^4$)

T_{alred} : temperatura de los alrededores, ($^{\circ}\text{K}$)

A_s : superficie de transferencia de calor, (m^2)

1.6.4. Combustible y combustión

Cualquier material que puede quemarse para liberar energía recibe el nombre de combustible. La mayoría de estos se componen principalmente de hidrógeno y carbono. Reciben el nombre de hidrocarburos y se denotan por la fórmula general C_nH_m . Los combustibles hidrocarburos existen en todas las fases, algunos de estos son el carbón, la gasolina y el gas natural (Cengel-Boles, 2008).

En la tabla 1.2 se puede observar, varios combustibles y su contenido energético, así como la comparación con la energía contenida en un litro de gasolina.

Una reacción química durante la cual se oxida un combustible y se libera una gran cantidad de energía recibe el nombre de combustión. El oxidante empleado con mayor frecuencia en este proceso es el aire, por obvias razones (es gratuito y se consigue fácilmente).

Durante un proceso de combustión los componentes que existen antes de la reacción reciben el nombre de reactivos, y los componentes que existen después de la reacción se denominan productos.

Tabla 1. 2. Comparación de algunos combustibles

Combustible	Contenido energético kJ/L	Equivalencia,* en gasolina, L/L de gasolina
Gasolina	31 850	1
Diesel ligero	33 170	0.96
Diesel pesado	35 800	0.89
LPG (gas licuado de petróleo, principalmente propano)	23 410	1.36
Etanol (o alcohol etílico)	29 420	1.08
Metanol (o alcohol metílico)	18 210	1.75
CNG (gas natural comprimido, principalmente metano, a 200 atm)	8 080	3.94
LNG (gas natural licuado, principalmente metano)	20 490	1.55

*Cantidad de combustible cuyo contenido energético es igual a la energía contenida en 1 litro de gasolina.

Fuente: (Cengel, 2007)

Muchas veces es útil estudiar la combustión de un combustible con la suposición de que esta es completa.



Figura 1. 5. Proceso de combustión completa.

Fuente: (Cengel-Boles, 2008)

El proceso está completo si todo el carbono en el combustible se transforma en CO₂ (dióxido de carbono), todo el hidrógeno se transforma en H₂O (agua) y todo el azufre (si lo hay) se transforma en SO₂ (dióxido de azufre). Por el contrario, un proceso de combustión es incompleto si los productos y componentes no están

quemados, como: C, H₂, CO (monóxido de carbono), ó OH (hidróxidos) (Cengel-Boles, 2008).

1.6.4.1. Poder calorífico

El poder calorífico de un combustible es la cantidad de calor proporcionada por los productos de su combustión al enfriarse hasta la temperatura inicial, después de una combustión completa a presión constante, los combustibles que se emplean con más frecuencia, y como ya se comentó, son los hidrocarburos, cuando estos reaccionan con el oxígeno, el hidrógeno forma H₂O. Si los productos de combustión están calientes, este H₂O es vapor; si los productos son enfriados hasta temperaturas atmosféricas normales, el vapor de agua se condensa, o por lo menos en gran parte, y el H₂O se vuelve líquido. Durante la condensación cede el calor de evaporación. De esta manera, si se considera únicamente este factor, se ve que puede haber por lo menos dos valores de poder calorífico en el caso de los combustibles que contienen hidrógeno; el poder calorífico superior "higher heating value", cuando se condensa el H₂O formado del combustible, y el poder calorífico inferior "lower heating value", cuando el combustible se quema de modo que el H₂O no se condensa (Faires-Simmang, 1983).

Para términos de cálculo de la eficiencia térmica, se utiliza el poder calorífico inferior del combustible, debido a que este es el calor real aprovechable y no el poder calorífico superior que es calor real producido.

En el anexo 2 se pueden observar el poder calorífico de varios combustibles que pueden ser útiles en la investigación.

1.6.5. Proceso de fundición en hornos

La fundición consiste en convertir los metales y sus aleaciones del estado sólido al estado líquido, generando cierta cantidad de calor, bien definida para cada metal y aleación. Una vez que se ha alcanzado la temperatura o punto de fusión es necesario suministrar calor para transformar la aleación o metal de sólido a líquido.

En la figura 1.6 se observa el proceso de fundición que va desde la selección de la materia prima hasta obtener la pieza terminada, además se puede diferenciar las etapas del proceso que son las siguientes:

- ✓ Fusión y tratamiento del metal: área de fundición;
- ✓ Preparación de moldes: área de moldeo;
- ✓ Llenado del molde, enfriamiento y solidificación y posterior desmoldeo: área de colada;
- ✓ Acabado de la pieza en bruto: área de acabado.

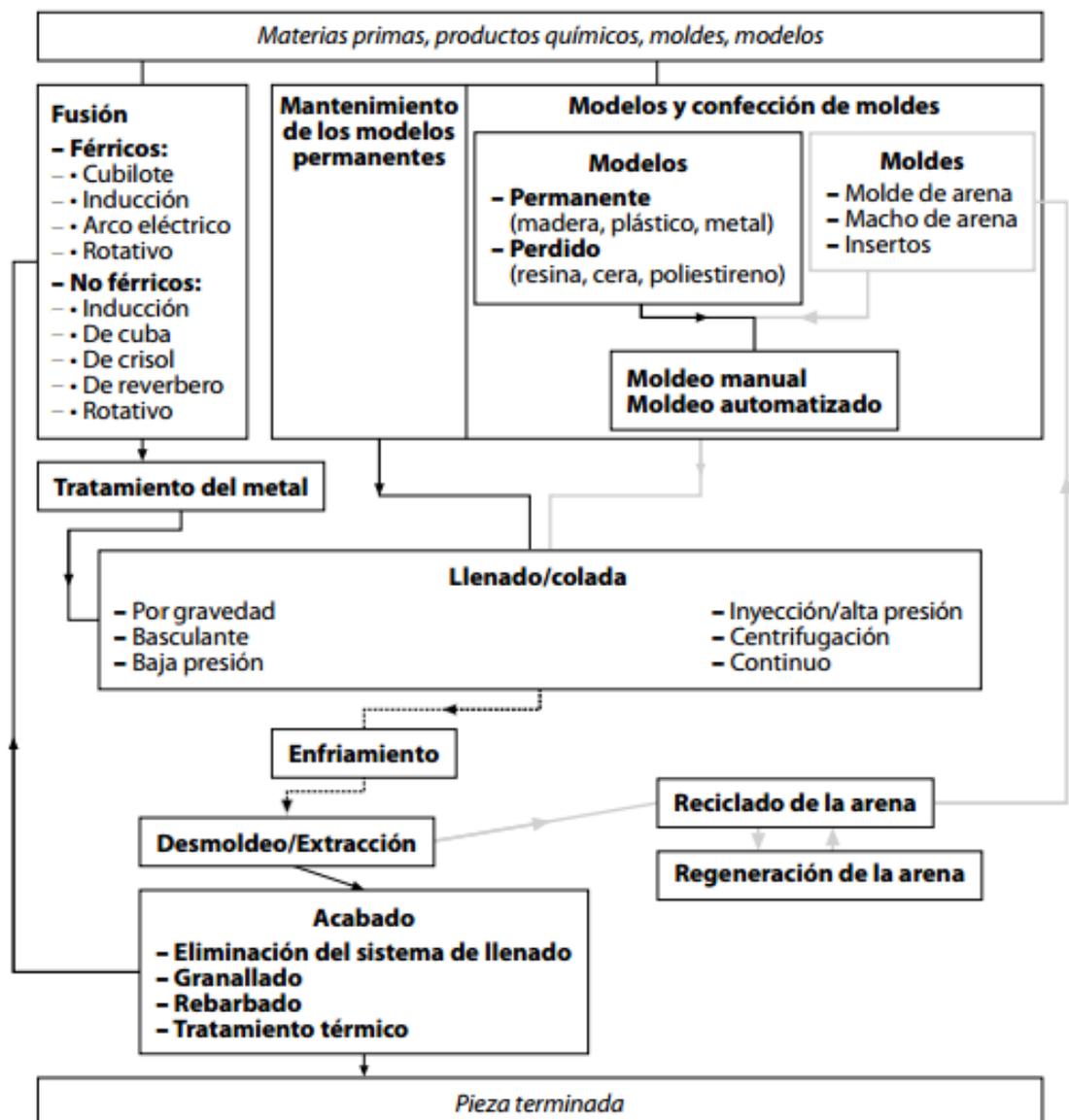


Figura 1. 6. Proceso de fundición.
Fuente: (MMAMRM, 2009)

Las fundiciones transforman metales férreos, no férreos y aleaciones, le dan forma definitiva o casi definitiva a los productos a través del llenado y la solidificación de metales o aleaciones en el interior de un molde. Se trata de un sector industrial diferenciado y diversificado que se compone de instalaciones de muy diverso tipo y tamaño; cada una de ellas presenta una combinación de tecnologías y operaciones unitarias propias, adaptadas al flujo de entrada, el tamaño de las series y los tipos de productos elaborados por las instalaciones específicas (MMAMRM, 2009).

Los principales mercados abastecidos por la industria de fundición son el de la automoción, la ingeniería general y la construcción.

Adicionalmente, en las fundiciones y de forma especial en las de aluminio se utilizan hornos de fusión de muy distinto tipo según las necesidades concretas de cada proceso. Se emplean hornos calentados directa e indirectamente mediante combustible y electricidad. Los combustibles fósiles que se emplean en la actualidad son el gas natural, el gas licuado de petróleo (GLP) y el fueloil. La mayoría de fundiciones se han decantado por el gas natural por una cuestión económica y de comodidad. El calentamiento mediante energía eléctrica tiene su origen en los elementos de resistencia o ser por inducción. Actualmente los hornos de inducción se utilizan cuando se requiere una elevada capacidad de fusión, por ejemplo de más de 10 t/h. Los hornos de cuba y los de mantenimiento, además de los de crisol, a menudo se emplean cuando la capacidad de fusión es inferior a 5 toneladas por hora. El horno de crisol pequeño o mediano se suelen usar cuando es necesario un cambio fácil de aleación o si el índice de producción es bajo. (MMAMRM, 2009).

1.6.6. Conformación por moldeo

La fabricación de piezas metálicas de una forma y tamaño definidos, fundiendo un metal o aleación y vertiéndolo en moldes contruidos previamente, es la técnica que se designa con el nombre de conformación por moldeo. Se conoce desde tiempos antiquísimos (Wikispaces, 2015).

Los procesos de fundición se dividen en dos categorías amplias, de acuerdo con el tipo de molde que se emplea: la fundición con molde desechable y la fundición con

molde permanente. Molde desechable significa que el molde en que se solidifica el metal derretido debe destruirse para retirarse el fundido. Estos moldes están hechos de arena, yeso o materiales similares, cuya forma se mantiene con el uso de aglutinantes de varias clases. La fundición con arena es el ejemplo más destacado de los procesos con moldes desechables. Un molde permanente es el que se utiliza para producir muchas piezas fundidas. Esta hecho de metal (o de un material refractario cerámico lo que es menos común) que soporta las temperaturas elevadas de la operación de fundición. En la fundición con molde permanente, este consiste en dos o más secciones que se abren para permitir el retiro de la pieza terminada. El troquel de fundición es el proceso más familiar de este grupo (Junchaya, 2010).

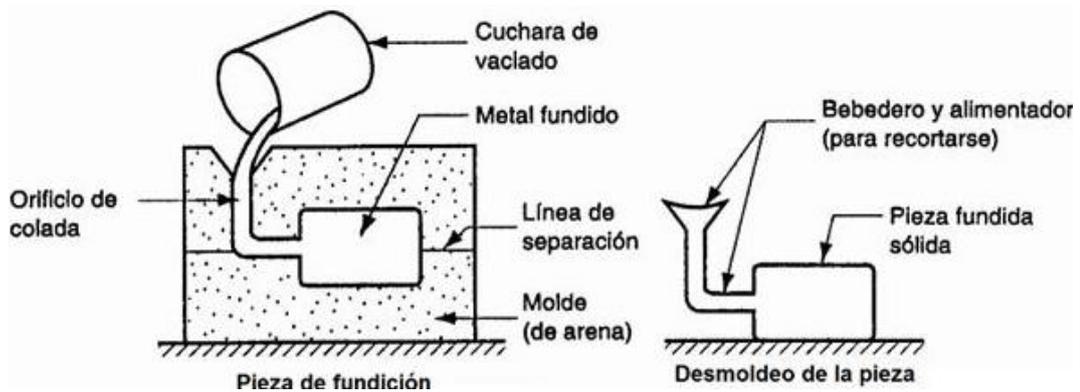


Figura 1. 7. Proceso de fundición con molde desechable.

Fuente: (Danna, 2014)

Los métodos de conformación por moldeo se determinan según el material del cual esté elaborado el molde.

Los tipos de moldeo se clasifican en los siguientes grupos:

- ✓ Colada por gravedad.
- ✓ Colada a presión.
- ✓ Colada centrífuga.
- ✓ Colada continúa.

El moldeo por gravedad se lo realiza vertiendo el metal fundido sobre un molde. El metal llena en este por su propio peso. Este es un proceso económico, apto para

temperaturas altas y todo tipo de metales, sin embargo existe el inconveniente de tenerse que realizar un molde para cada pieza; este es el método que se utiliza para moldear en el Laboratorio de Fundición. Por otro lado existe otro tipo de moldeo por gravedad que es el de colada por coquilla, son moldes metálicos permanentes (normalmente de acero o fundición gris) que, al contrario que el método de moldeo con arena, permite obtener un número muy elevado de piezas iguales utilizando el mismo molde. Las coquillas son mucho más caras que los moldes de arena, pero resulta rentable si se fabrican con ellas un número elevado de piezas (hasta miles). Presenta otra ventaja, al ser el molde metálico, la velocidad a la que se enfría la pieza es mayor; además, la precisión de las piezas obtenidas es mejor (Pulido, 2009).

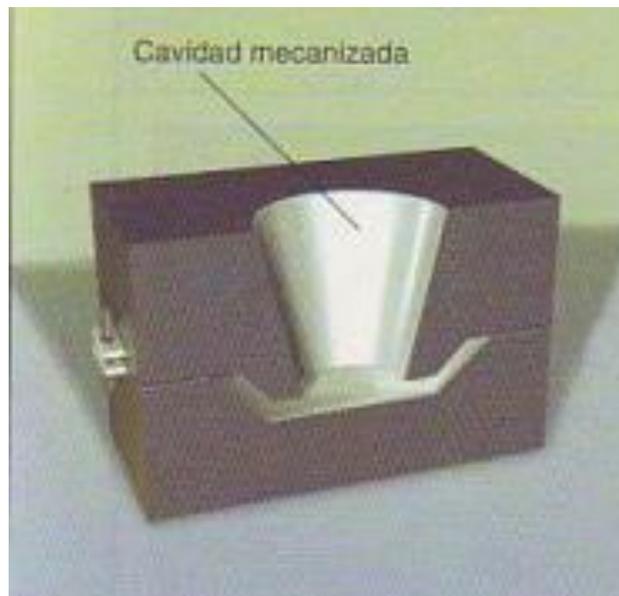


Figura 1. 8. Molde permanente o coquilla.

Fuente: (Pulido, 2009)

Otra categoría de moldeo es el de colada por presión o inyección, se lleva a cabo introduciendo la masa metálica fundida en el interior del molde forzando la entrada en el mismo. En este método se emplean moldes permanentes. El metal se inyecta en el molde por medio de una máquina, que suele ser un émbolo. Los moldes son coquillas, aunque se suelen denominar matrices. Este método presenta la ventaja de que pueden fabricarse piezas de formas complicadas de una manera bastante económica y de gran precisión (Pulido, 2009).



Figura 1. 9. Proceso de fundición por inyección.
Fuente: (Pulido, 2009)

La otra gran variedad de moldeo es por fuerza centrífuga, este tipo de colada se realiza haciendo girar el molde alrededor de un eje, con lo que la fuerza centrífuga obliga al metal fundido a rellenar todas las cavidades del mismo. Se emplea fundamentalmente para moldear piezas de revolución (por ejemplo tubos), el espesor del tubo estará en función de la cantidad de metal colado (Pulido, 2009).

El moldeo por colada continua, consiste en llenar un recipiente de metal fundido procedente de los hornos de fundición. El metal cae por un orificio, se solidifica y se obtiene una tira continua de sección semejante a la del molde. Esta tira cae en vertical y va avanzando para ser cortada posteriormente (Pulido, 2009).

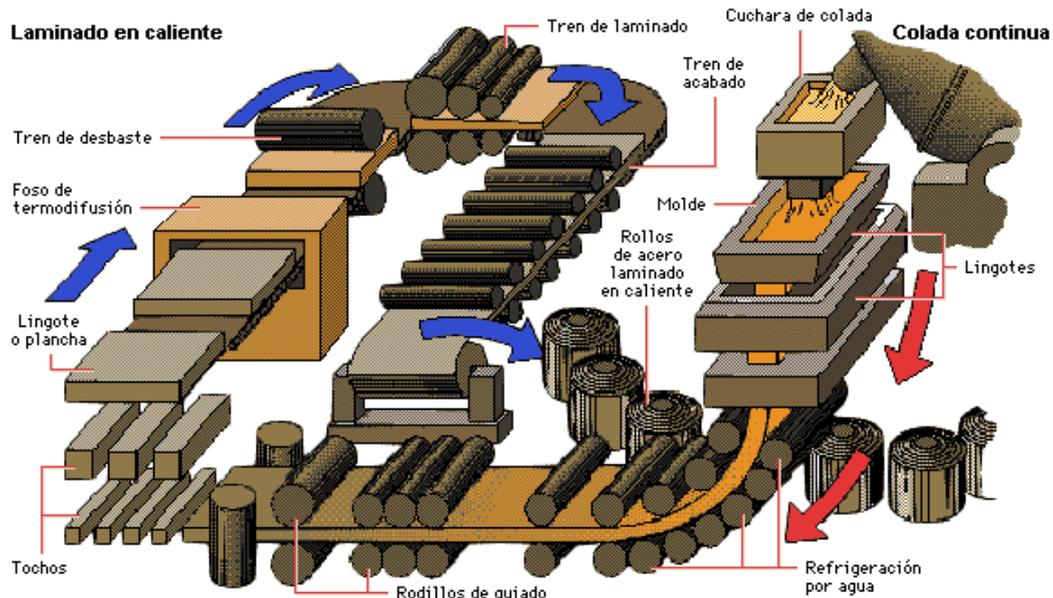


Figura 1. 10. Colada continua. Laminado en caliente.
Fuente: (Pulido, 2009)

1.6.7. Hornos de fundición.

La elección del horno de fusión es una fase importante del proceso de fundición. Cada tipo de horno tiene sus propios requisitos en cuanto a la alimentación y las posibilidades de aleación, lo que a su vez repercute en todo el proceso. Por otro lado, el tipo de metal que va a fundirse determina qué hornos pueden utilizarse y cuáles no. La aplicabilidad de los distintos hornos se muestra en la tabla 1.3.

Tabla 1. 3. Aplicabilidad según tipo de horno

	Cubilote	Arco eléctrico	Inducción	Crisol / cucharón
Hierro	x	x	x	
Aluminio			x	x
Cobre			x	x
Plomo			x	x
Magnesio				x

El horno de cubilote ha sido empleado desde hace varios siglos en la producción de hierro gris, además es una unidad de proceso semicontinuo diseñada para trabajar en campañas con duración de 6 h a varios días, en algunos casos. Éstos se cargan por la parte superior y su longitud vertical está limitada para garantizar el calentamiento y fusión del material, almacenándose éste en su parte baja (Ortiz-Ruiz, 2013).

Los hornos de inducción se utilizan tanto para fundir metales féreos como no féreos. Existen distintos tipos de hornos de inducción, pero todos funcionan aprovechando el fuerte campo magnético creado cuando la corriente eléctrica pasa por una bobina que envuelve el horno. Este campo magnético crea una tensión intermedia y, finalmente, una corriente eléctrica a través del metal que va a fundirse. La resistencia eléctrica del metal produce calor y sirve a su vez para fundirlo. Los hornos de inducción pueden adoptar formas y tamaños muy distintos. Al no existir contacto entre la carga y el portador de energía resulta apropiado para fundir acero, hierro y metales no féreos (MMAMRM, 2009).



Figura 1. 11 Horno de cubilote
Fuente: (Ortiz-Ruiz, 2013)

El horno de inducción posee algunas ventajas, que hacen que este horno sea una de las mejores alternativas para la fusión de metales, las mismas se enumeran a continuación:

- ✓ Mayor flexibilidad en el régimen de fusión y en las aleaciones.
- ✓ Menor tiempo de fusión.
- ✓ Menor impacto medioambientales.
- ✓ Escaso mantenimiento dependiendo de la vida útil del revestimiento refractario.

Sin embargo no todas son ventajas en este tipo de horno, existen algunos detrimentos que se acotan a continuación:

- ✓ Los costes energéticos son superiores a los del empleo de combustibles fósiles.
- ✓ La acción depuradora de los hornos de inducción sobre la colada es limitada.
- ✓ Las instalaciones precisan grandes inversiones.
- ✓ La eficiencia es baja durante el mantenimiento a consecuencia de las pérdidas de calor que se producen en la bobina de inducción refrigerada por aire.

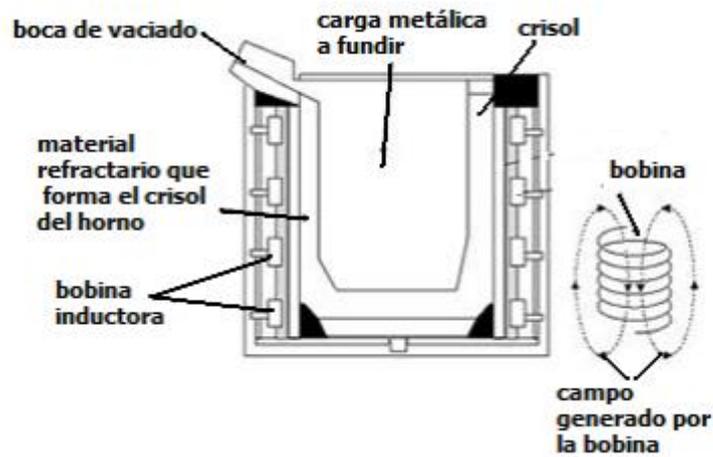


Figura 1. 12. Horno de inducción
Fuente: (Ortiz-Ruiz, 2013)

Los hornos tipo crisol son calentados externamente por la combustión de gases, electricidad, o si las temperaturas son bajas, gases calientes. Se evita el contacto directo con la llama para que no se creen puntos calientes en la base del crisol de forma que permita mantener un buen control de la temperatura de la colada y evitar la oxidación y la vaporización del metal.

Sólo se utilizan en la fusión de metales no férreos. A causa del calentamiento indirecto (a través de la pared del crisol) no se produce requemado ni absorción de gases. Los hornos de crisol se emplean para producir pequeñas cantidades de metal fundido (menos de 500 kg cada vez) y para producciones de baja capacidad.

Aparte de la renovación periódica del crisol no se requiere mantenimiento. La periodicidad depende básicamente del tipo de aleación que se funde. Los cambios frecuentes de aleación desgastan prematuramente el crisol. Los crisoles de SiC

(carburo de silicio), utilizados en las bajas aleaciones, tienen una vida útil de entre 130 y 150 cargas, que en el caso de las altas aleaciones se reduce a entre 50 y 80 (MMAMRM, 2009).



Figura 1. 13. Horno de crisol NABERTHERM.
Fuente: (Nabertherm, 2010)

Al usar este tipo de horno se obtienen grandes ventajas, las mismas que se describen a continuación:

- ✓ Tecnología simple.
- ✓ Poco mantenimiento.
- ✓ Flexibilidad al cambiar de aleación.

A pesar de estas ventajas descritas, existen algunas contrariedades detalladas:

- ✓ Eficiencia y capacidad de producción bajas.

El horno de crisol que se analizará en la presente investigación es un horno de crisol tipo Bale-Out; en este tipo de horno el material es fundido en el horno y cuando se encuentra en estado líquido es retirado del crisol mediante accesorios llamados “cucharas” y transferido a los moldes.

1.6.8. Crisol

El crisol es el recipiente utilizado para albergar metales a ser fundidos en un horno y es utilizado para soportar las altas temperaturas encontradas en la fundición metálica. El material del crisol debe tener una alta temperatura de fusión, mucho mayor que la del metal a fundir, resistente al ataque químico del metal y, además, debe tener una excelente resistencia en caliente (Flores-Orellana, 2014).

Para el aluminio y sus aleaciones se utilizan crisoles de arcilla grafitada, carburo de silicio y de hierro fundido. Según la aplicación se les exigen las siguientes condiciones: resistencia frente a la acción del aluminio líquido y los medios de tratamiento del fundido, buena conductividad, resistencia térmica y mecánica y a la vez resistencia a los cambios de temperatura.

1.7. Conclusiones del capítulo

- ✓ En la literatura consultada existe un soporte satisfactorio para la evaluación de la eficiencia térmica del horno de fundición tipo crisol, no obstante, para mejorar la eficiencia se deben considerar los parámetros operacionales adecuados que colaboren esta finalidad.
- ✓ Existen una gran variedad de hornos de fundición, sin embargo, el horno de crisol posee grandes ventajas con respecto a esta gran diversificación de hornos, estas facilidades posibilitan el desarrollo de la investigación y sobre todo que se pueda mejorar la eficiencia térmica.

CAPÍTULO II

PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DEL PROCESO DE FUNDICIÓN EN EL HORNO DE CRISOL

El proceso de fundición de aluminio en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana depende de diversos parámetros fundamentales los cuales deben ser considerados en la evaluación de la eficiencia térmica. En este sentido, el establecimiento de los modelos matemáticos que describen el proceso de fundición no resulta insignificante.

El objetivo de este capítulo consiste en establecer los procedimientos matemáticos de los flujos de transferencia de calor durante el proceso de fundición de aluminio, la distribución de temperatura que experimenta el horno de crisol, así como la modelación con métodos numéricos, al utilizar el método de elementos finitos.

2.1. Energía requerida para llevar a cabo la fusión del metal

La energía necesaria para fundir cualquier metal puede simplificarse si se supone que su conductividad térmica no varía en cierto intervalo de temperaturas. El error introducido debido a la suposición resulta ser pequeño para esta aplicación en específico. Para el cálculo se toma en cuenta los diferentes calores específicos de los elementos en sus diferentes estados así como el calor latente de fusión requerido para cambiar de estado al material. El procedimiento se presenta a continuación.

Mediante la variación de temperatura del elemento en análisis se puede determinar el calor necesario para fundir el material, para ello se usa la ecuación 2.1. Sin embargo para esta finalidad se deben calcular tres diferentes tipos de calor, el primero de ellos es el calor necesario para llevar al material a su punto de fusión.

$$Q_{Al-1} = \frac{m \cdot C_{p_{Al-s}} \cdot \Delta T_1}{t_1} \quad (\text{Ecu. 2.1})$$

Donde:

Q_{Al-1} : calor hasta alcanzar el punto de fusión, (kW).

m : masa del material a fundir, (kg).

$C_{p_{Al-s}}$: calor específico del aluminio en estado sólido, (kJ/kg K).

ΔT_1 : variación de temperatura, desde temperatura ambiente hasta alcanzar la temperatura de fusión, (K).

t_1 : tiempo, hasta alcanzar la temperatura de fusión, (s).

El segundo, es el calor latente de fusión, que es el calor necesario para que cambie de estado sólido a líquido una vez que alcance la temperatura de fusión.

$$Q_{Al-2} = \frac{m \cdot h_{Al-f}}{t_2} \quad (\text{Ecu. 2.2})$$

Donde:

Q_{Al-2} : calor latente de fusión, (kW).

h_{Al-f} : calor latente de fusión por unidad de masa, (kJ/kg).

t_2 : tiempo necesario para que el metal pase de sólido a líquido, (s).

Finalmente es necesario determinar el calor para que el metal fundido llegue hasta su temperatura de colada.

$$Q_{Al-3} = \frac{m \cdot C_{p_{Al-l}} \cdot \Delta T_2}{t_3} \quad (\text{Ecu. 2.3})$$

Donde:

Q_{Al-3} : calor hasta alcanzar la temperatura de colada, (kW).

$C_{p_{Al-l}}$: calor específico del aluminio en estado líquido, (kJ/kg K).

ΔT_2 : variación de temperatura, desde temperatura de fusión hasta alcanzar la temperatura de colada, (K).

t_3 : tiempo hasta alcanzar la temperatura de colada, (s).

Por último se determina la cantidad total de calor para el proceso de fundición de aluminio, que es la suma de los calores determinados anteriormente.

$$Q_f = Q_{Al-1} + Q_{Al-2} + Q_{Al-3} \quad (\text{Ecu. 2.4})$$

Donde:

Q_f : calor de fusión del aluminio, (kW).

2.2. Calor perdido al ambiente

Bajo condiciones estables de operación, con una temperatura interna de 1100 °C las pérdidas de calor del horno darán un parámetro de cuanto combustible será necesario para mantener el horno a esa temperatura.

Las pérdidas de calor se pueden producir por diferentes métodos, tales como, conducción, convección y radiación.

Las pérdidas por conducción se producen por:

- ✓ Las paredes.
- ✓ La cubierta.
- ✓ El fondo del horno.

Las pérdidas por convección se producen en las superficies expuestas al aire frío o caliente del ambiente circundante. Y las pérdidas por radiación se producen en toda superficie con alta emisividad, siendo considerable a altas temperaturas.

Las paredes del horno forman un cilindro hueco de paredes. Asumiendo transferencia de calor unidireccional en dirección al radio de la pared y una temperatura exterior, se realiza un diagrama para visualizar la transferencia de calor, (figura 2.1), que es la ecuación de transferencia de calor para estado estable.

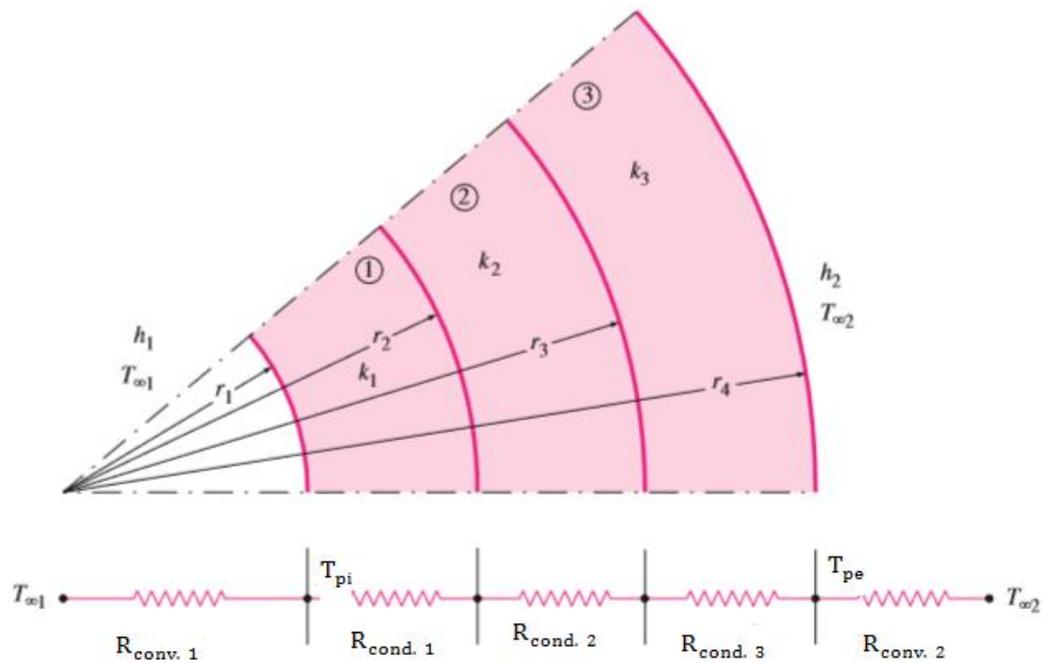


Figura 2. 1. Diagrama de transferencia de calor por las paredes del horno.

La transferencia de calor estacionaria a través de capas cilíndricas múltiples se puede manejar como en el caso de las paredes planas de capas múltiples, simplemente al sumar una resistencia adicional en serie por cada capa adicional. Para el caso especial de las paredes del horno de fundición de aluminio, la razón de la transferencia de calor estacionaria a través del cilindro compuesto de tres capas y de altura L .

$$\dot{Q}_{\text{conv-cond}} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{R_{\text{total}}} \quad (\text{Ecu. 2.5})$$

Donde:

$\dot{Q}_{\text{conv-cond}}$: transferencia de calor por conducción y convección, (kW).

$T_{\infty 1}$: temperatura del fluido interno, ($^{\circ}\text{C}$).

$T_{\infty 2}$: temperatura del fluido externo, ($^{\circ}\text{C}$).

R_{total} : resistencia total, por conducción y convección, ($^{\circ}\text{C}/\text{W}$).

Sin embargo las paredes cilíndricas del horno de fundición, están compuestas de tres capas diferentes por lo que es necesario determinar la resistencia térmica por conducción de cada una de estas capas.

$$R_{cond. 1} = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot L} \quad (\text{Ecu. 2.6})$$

Donde:

$R_{cond. 1}$: resistencia térmica de la primera capa, (°C/W)

r_2 : radio exterior de la primera capa, (m).

r_1 : radio interior de la primera capa, (m).

k_1 : conductividad térmica de la primera capa, (W/m °C).

L: altura del horno, (m).

$$R_{cond. 2} = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot L} \quad (\text{Ecu. 2.7})$$

Donde:

$R_{cond. 2}$: resistencia térmica de la segunda capa, (°C/W)

r_2 : radio exterior de la segunda capa, (m).

r_3 : radio interior de la segunda capa, (m).

k_2 : conductividad térmica de la segunda capa, (W/m °C).

$$R_{cond. 3} = \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_3 \cdot L} \quad (\text{Ecu. 2.8})$$

Donde:

$R_{cond. 3}$: resistencia térmica de la tercera capa, (°C/W)

r_3 : radio exterior de la tercera capa, (m).

r_4 : radio interior de la tercera capa, (m).

k_3 : conductividad térmica de la tercera capa, (W/m °C).

Para determinar la resistencia térmica por convección, en el fluido interno como en el fluido externo, se establecen las siguientes expresiones:

$$R_{conv. 1} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1} \quad (\text{Ecu. 2.9})$$

Donde:

$R_{conv. 1}$: resistencia térmica por convección del fluido interno, (°C/W).

h_1 : coeficiente de transferencia de calor convectivo interno, (W/m²).

A_1 : área superficial de la pared interna del cilindro, (m²).

$$R_{conv. 2} = \frac{1}{h_2 \cdot A_2} \quad (\text{Ecu. 2.10})$$

Donde:

$R_{conv. 2}$: resistencia térmica por convección del fluido externo, (°C/W).

h_2 : coeficiente de transferencia de calor convectivo externo, (W/m²).

A_2 : área superficial de la pared externa del cilindro, (m²).

El efecto de la convección se determina al conocer los coeficientes de transferencia de calor convectivos “ h ”. Para su determinación se hacen las siguientes consideraciones: Se supone una temperatura interior del fluido y aire exterior a temperatura ambiente. Se supone una presión externa igual a la atmosférica.

Otro aspecto importante es el concepto de temperatura de película que es el promedio aritmético de las temperaturas de la superficie y del flujo adyacente.

Por medio de tablas se determina las propiedades del aire para el cálculo del coeficiente de transferencia convectivo, ver anexo 8. Estas propiedades son la viscosidad cinemática, densidad, conductividad térmica, número de Prandtl.

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (\text{Ecu. 2.11})$$

Donde:

T_f : temperatura de película, (°C).

T_s : temperatura de superficie, (°C).

T_∞ : temperatura de flujo libre, (°C).

El número de Grashof, el cual es adimensional y representa la razón entre la fuerza de empuje y la fuerza viscosa que actúan sobre el fluido, rige el régimen de flujo en la convección natural (Cengel, 2007).

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (\text{Ecu. 2.12})$$

Donde:

Gr_L : número de Grashof.

g : aceleración gravitacional, (m/s²).

β : coeficiente de expansión volumétrica, (1/ K).

L_c : longitud característica de la configuración geométrica, (m).

ν^2 : viscosidad cinemática del fluido, (m²/s).

La ecuación 2.13 se utiliza para verificar si el cilindro puede analizarse como una placa plana vertical (Cengel, 2007).

$$D \geq \frac{35 \cdot L}{Gr_L^{1.4}} \quad (\text{Ecu. 2.13})$$

Donde:

D : diámetro exterior del horno de fundición, (m).

Si esto se cumple, se puede analizar como una placa plana vertical. Por consiguiente, se obtiene el número de Rayleigh, que es el producto de los números de Grashof y de Prandtl. (Cengel, 2007).

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \quad (\text{Ecu. 2.14})$$

Donde:

Ra_L : número de Rayleigh.

Para una placa plana vertical, el número de Nusselt se determina mediante la ecuación 2.15, (Cengel, 2007).

$$Nu = \left\{ 0.6 + \frac{0.387 \cdot Ra_L^{1/6}}{[1 + (0.559/Pr)^{9/16}]^{8/27}} \right\}^2 \quad (\text{Ecu. 2.15})$$

Donde:

Nu: número de Nusselt.

El coeficiente de transferencia de calor por convección se puede determinar con la siguiente expresión:

$$h = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (\text{Ecu. 2.16})$$

Donde:

h: coeficiente de transferencia de calor por convección, (W/m² °C)

k: conductividad térmica (W/m . °C).

Al compilar las expresiones de resistencia térmica por conducción y convección se obtiene como resultado una ecuación de resistencia total.

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_3 \cdot L} \quad (\text{Ecu. 2.17})$$

$$\dot{Q}_{\text{conv-cond}} = \frac{(T_{\infty 1} - T_{\infty 2})}{\frac{1}{h_1 \cdot A_1} + \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_1 \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_2 \cdot L} + \frac{\ln\left(\frac{r_4}{r_3}\right)}{2 \cdot \pi \cdot k_3 \cdot L} + \frac{1}{h_2 \cdot A_2}} \quad (\text{Ecu. 2.18})$$

Por último, se puede determinar la transferencia de calor por radiación mediante la ecuación 1.3

$$\dot{Q}_{\text{rad}} = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\text{alred}}^4)$$

La transferencia de calor total al ambiente por las paredes se obtiene al sumar individualmente las aportaciones provenientes de las pérdidas por conducción, convección y radiación, las que se indican en la expresión siguiente:

$$\dot{Q}_{\frac{\text{conv-cond}}{\text{rad}}} = \dot{Q}_{\text{conv-cond}} + \dot{Q}_{\text{rad}} \quad (\text{Ecu. 2.19})$$

Para el cálculo de la transferencia de calor hacia el ambiente en la cubierta se determina de la misma forma que se lo hace para las paredes del horno, tomando en cuenta de que es una placa circular con un agujero en el centro, por otro lado para el cálculo de pérdidas de calor por el piso solo se debe tener en cuenta que está compuesto de una capa de cemento refractario y la capa metálica, en ambos casos cambia la superficie de intercambio de calor.

2.3. Modelación con métodos de elementos finitos (ANSYS)

Otra manera de obtener la transferencia de calor que se provoca desde el horno de fundición de aluminio hacia el aire exterior, es mediante la modelación numérica con el método de elementos finitos y el uso de software especializado para este cometido.

El software de análisis de elemento finito, ANSYS, es un programa utilizado para el desarrollo de los siguientes aspectos:

- ✓ Construir modelos en computadoras o transferir modelos CAD de estructuras, productos, componentes o sistemas.
- ✓ Respuestas a estudios físicos tales como esfuerzos, distribución de temperaturas campos electromagnéticos.
- ✓ Optimizar un diseño rápidamente en el desarrollo de un proceso para reducir los costos de producción.
- ✓ Ser prueba prototipo en entornos donde puede ser no desarrollada o imposible.

Dentro de las aplicaciones que se derivan del programa ANSYS se puede destacar, los análisis estructurales lineales o no lineales; los análisis térmicos y termoeléctricos en estado estacionario y transitorio; y los análisis magnéticos entre otros.

El análisis térmico es utilizado para calcular la distribución de temperaturas y las variables relacionadas térmicamente en un objeto. Las variables térmicas más importantes son: la cantidad de calor generado o perdido, los gradientes térmicos y el flujo térmico.

El análisis térmico juega un papel importante en el diseño de muchas aplicaciones de ingeniería: motores de combustión interna, intercambiadores de calor, sistemas de tuberías, componentes electrónicos, envases a presión y procesos de conformado de metales a altas temperaturas, solo por mencionar algunos.

La ecuación que rige los fenómenos térmicos en cuerpos isotrópicos es:

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(K \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(K \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(K \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \dot{q} = C_p \cdot \rho \left(\frac{\partial T}{\partial t} \right) \quad (\text{Ecu. 2.20})$$

Donde:

C_p : $C_p(x, y, z, T)$: calor específico a presión constante.

ρ : $\rho(x, y, z, T)$: densidad del material.

K : $K(x, y, z, T)$: conductividad térmica del material.

t : tiempo.

\dot{q} : calor generado por fuentes internas.

$T: T(x, y, z, t)$: temperatura en el sólido.

A pesar de establecer la ecuación para fenómenos térmicos en cuerpos isotrópicos, es necesario hacer algunas consideraciones para el caso especial del horno que se está investigando, las mismas que son: no existe generación de calor por fuentes internas, además el término que está en función del tiempo, por ser un estado de flujo estable, se asume como si no cambiase la temperatura.

2.4. Pérdidas de calor por gases de combustión

El combustible a utilizar en el proceso de fundición de aluminio, en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, es el gas licuado de petróleo, el que es una mezcla de propano y butano, debido a que el quemador del horno es para este tipo de gas.

Los requerimientos de aire u oxígeno para diferentes combustibles que permita alcanzar la combustión estequiométrica son descritos en la tabla 2.1. Sin embargo, una combustión completa no puede alcanzarse en la realidad ya que los reactivos y reactantes están compuestos de otras moléculas que al reaccionar forman productos ajenos a la combustión completa.

De la tabla 2.1 se observa la cantidad de aire por kg de gas combustible para que ocurra la combustión estequiométrica, se recomienda 20 % de aire en exceso para asegurar la combustión completa. Sin embargo hay que tener cuidado de no exceder la cantidad de aire de manera innecesaria, pues eso genera una disminución sensible del calor suministrado por el combustible.

Las mayores pérdidas de calor en un horno se deben a los gases de escape, estos salen del horno con un contenido energético que dependerá de la eficiencia del horno; es decir, de la capacidad del horno para transferir esa energía a la carga y/o a las paredes. Usualmente los hornos de crisol tienen una eficiencia baja.

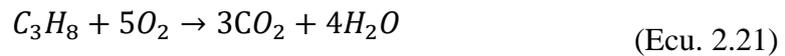
Tabla 2. 1. Requerimiento de oxígeno o aire para la combustión estequiométrica

Sustancia	Producto	En peso, kg de		En volumen, m ³ de	
		comburente/kg combustible	Aire	comburente/m ³ combustible	Aire
Carbono	CO	1.33	5.75	Sólido	Sólido
Carbono	CO ₂	2.66	11.51	Sólido	Sólido
Hidrógeno	H ₂ O	7.94	34.30	0.5	2.39
Metano	CO ₂ + 2H ₂ O	3.99	17.24	2.0	9.57
Etano	2CO ₂ + 3H ₂ O	3.72	16.07	3.5	16.75
Propano	3CO ₂ + 4H ₂ O	3.63	15.68	5.0	23.95
Butano	4CO ₂ + 5H ₂ O	3.58	15.46	6.5	31.14
Acetileno	2CO ₂ + H ₂ O	3.07	13.26	2.5	11.96
Azufre	SO ₂	1.00	4.32	Sólido	Sólido
Azufre	SO ₃	1.5	6.48	Sólido	Sólido

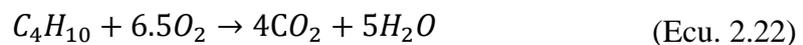
Por lo tanto se plantea seguir la ecuación química acerca de la mezcla aire-combustible, que es una relación de masas entre el combustible y el comburente necesario para que se produzca la reacción química.

De manera preliminar es ineludible igualar la ecuación de la reacción en el caso de aire estequiométrico completo, de tal manera que se conozca la cantidad adecuada de oxígeno, obteniéndose las siguientes expresiones:

Propano:



Butano:



Por lo tanto, la cantidad adecuada de aire para que se produzca la combustión estequiométrica es:

Propano:

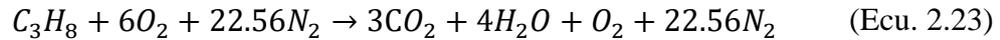
$$5(O_2 + 3.76N_2)$$

Butano:

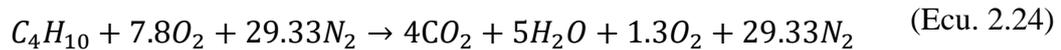
$$6.5(O_2 + 3.76N_2)$$

Considerando el 20 % de exceso de aire, las ecuaciones de la reacción de la combustión quedan definidas de la siguiente manera:

Propano:



Butano:



Puesto que ambos, los reactivos y los productos están en el mismo estado, el cambio de entalpía durante este proceso se debe únicamente a los cambios en la composición química del sistema. Este cambio de entalpía será distinto para diferentes reacciones, y sería deseable tener una propiedad que represente los cambios en la energía química durante una reacción. Esta propiedad es la entalpía de reacción h_R , que se define como la diferencia entre la entalpía de los productos en un estado específico y la entalpía de los reactivos en el mismo estado.

En procesos de combustión, como el que se está analizando, la entalpía de reacción suele conocerse como la entalpía de combustión h_C , la que representa la cantidad de calor liberado durante el proceso a flujo estable cuando 1 kmol (o 1 kg) de combustible se quema por completo.

Otro término empleado en conjunto con la combustión es el poder calorífico del combustible, en otras palabras, el poder calorífico de un combustible es igual al valor absoluto de la entalpía de combustión (Cengel-Boles, 2008).

$$\text{Poder calorífico} = |h_C| = H_{Prod} - H_{React} \quad (\text{Ecu. 2.25})$$

$$|h_C| = \sum N_{Prod} \cdot h_{f_{Prod}}^o - \sum N_{React} \cdot h_{f_{React}}^o \quad (\text{Ecu. 2.26})$$

Donde:

$|h_C|$: valor absoluto de la entalpía de combustión, (kJ/kgmol_{combustible}).

H_{Prod} : entalpia de los productos, (kJ/kgmol).

H_{React} : entalpia del reactante, (kJ/kgmol).

N_{Prod} : número de moles de los productos, (kmol).

$h_{f\,Prod}^o$: entalpia de formación de los productos, (kJ/kgmol).

N_{React} : número de moles del reactante, (kmol).

$h_{f\,React}^o$: entalpia de formación del reactante, (kJ/kgmol).

Para determinar la relación aire – combustible se aplica la siguiente expresión:

$$r_{a/c} = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (\text{Ecu. 2.27})$$

Donde:

$r_{a/c}$: relación aire combustible, (kg aire / kg combustible).

m_{aire} : masa del aire, (kg).

m_{comb} : masa del combustible, (kg).

La relación aire – combustible promedio considerando los porcentajes de cada uno de los elementos que componen el combustible (gas licuado de petróleo), está definido como:

$$r_{a/c} = \left(r_{a/c\,propano} \right) \cdot 60 \% + \left(r_{a/c\,butano} \right) \cdot 40 \% \quad (\text{Ecu. 2.28})$$

Una vez que se ha determinado la entalpia de combustión para el gas licuado de petróleo (PCI), relación aire combustible, además se posee la temperatura de trabajo y la temperatura del aire exterior, y mediante tablas se selecciona el calor específico del aire a temperatura de colada, se determina la eficiencia por kilogramo de combustible quemado.

Para determinar la pérdida de energía por los gases de combustión se calculan mediante la siguiente ecuación:

$$\dot{Q}_{gases} = \dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot (T_g - T_{ref}) \quad (\text{Ecu. 2.29})$$

Donde:

\dot{Q}_{gases} : calor perdido por gases combustión, (kW).

\dot{m}_g : flujo másico de los gases de combustión, (kg/s).

C_{p_g} : calor específico medio de los gases de combustión, (kJ/kg°C).

T_g : temperatura de gases, (°C).

T_{ref} : temperatura referencial ambiente, (°C).

Finalmente para determinar la eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, se establece la ecuación 2.30:

$$\eta_{horno} = \frac{\dot{Q}_{util}}{\dot{Q}_{in}} \quad (\text{Ecu. 2.30})$$

Donde:

η_{horno} : eficiencia térmica del horno.

\dot{Q}_{in} : energía de entrada, (kW).

\dot{Q}_{util} : energía útil en el proceso de fundición, (kW).

2.5. Conclusiones del capítulo

- ✓ En la ecuación (2.4) se establece el calor necesario que hay que administrar, para conseguir que el metal cambie de fase sólida a líquida, así como el calor preciso para llegar a la temperatura de colada.

- ✓ En la fórmula (2.18) y (2.19) quedan establecidas las pérdidas de calor por conducción y convección en paredes cilíndricas, como la pérdida total por transferencia de calor tomando en cuenta los procesos de conducción, convección y radiación, respectivamente.
- ✓ En la expresión (2.26) se indica el modelo apropiado para determinar el poder calorífico inferior del combustible gaseoso (gas licuado de petróleo), el que será usado para el cálculo de la eficiencia térmica global del horno de fundición.
- ✓ El modelo presentado en la ecuación (2.30) representa la eficiencia térmica el horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, con los actuales parámetros operacionales.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS DE RESULTADOS OBTENIDOS EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO EN EL HORNO TIPO CRISOL

El horno de fundición de aluminio tipo crisol que es utilizado actualmente en los Laboratorios de Ingeniería Mecánica de la Universidad Politécnica Salesiana, se encuentra fundiendo aluminio a razón de ocho veces al año, sin embargo los recursos consumidos durante el proceso generan un elevado costo, del mismo modo, el calor que desprende el equipo en el momento que está funcionando es desmesurado lo que provoca que la eficiencia sea baja. Los objetivos del presente capítulo son:

- ✓ Determinar la eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio.
- ✓ Simular las pérdidas de calor por conducción, convección y radiación mediante el método de elementos finitos.

3.1. Cálculo de la energía para la fusión de aluminio

Para establecer la eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio, es indispensable determinar de manera preliminar el calor necesario en el proceso de transformar el metal sólido a líquido, para ello se va a utilizar las expresiones referenciadas en el capítulo anterior, esto se describe de manera clara mediante la tabla 3.1. El valor de calor específico de aluminio a diferentes temperaturas se encuentra en el anexo 4, y el calor latente de fusión en el anexo 5. Por otra parte, es necesario conocer la cantidad de material a fundir, para el caso de los crisoles que posee la Universidad Politécnica Salesiana, la cantidad máxima de aluminio que se puede fundir es de 45 kg.

Tabla 3. 1. Resultados de la energía para alcanzar la temperatura de colada.

Descripción	Resultado	Ecuación
Energía hasta alcanzar el punto de fusión, Q_{Al-1}	12.442 kW	(2.1)
Energía procedente del calor latente de fusión, Q_{Al-2}	17.9 kW	(2.2)
Energía hasta alcanzar la temperatura de colada, Q_{Al-3}	11.173 kW	(2.3)
Energía necesaria para la fusión del aluminio, $Q_f = Q_{Al-1} + Q_{Al-2} + Q_{Al-3}$	41.515 kW	(2.4)

Es indispensable conocer como varia la temperatura en función del tiempo y como aumenta la temperatura cuando se le añade calor al proceso de fundición, es por esto que se recurre a las siguientes graficas:

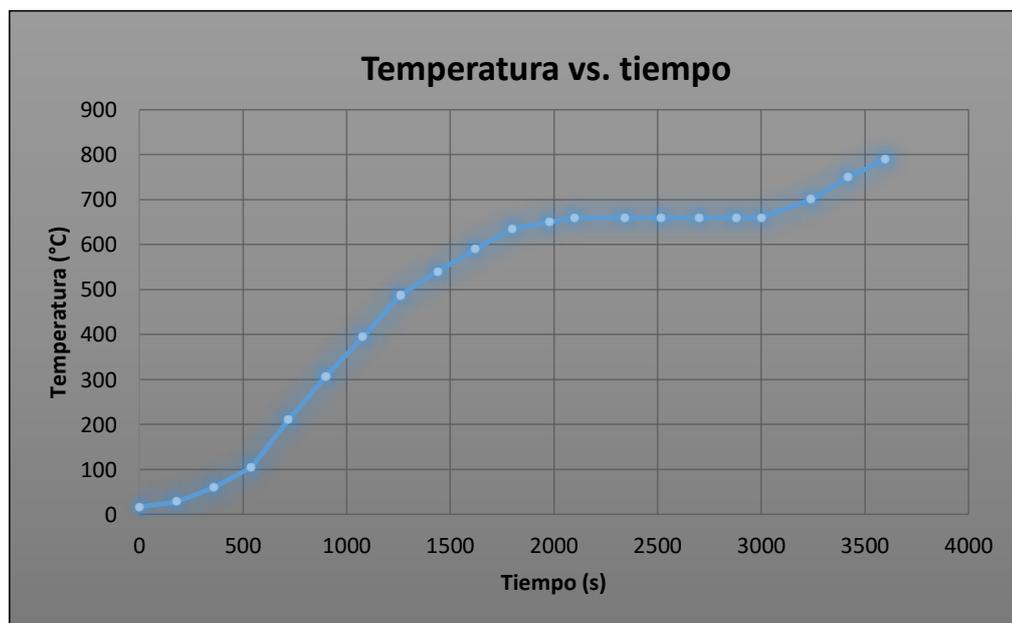


Figura 3. 1 Grafica Temperatura vs. tiempo

La figura 3.1, describe el cambio de temperatura a través del tiempo, el que se observa el progresivo aumento de temperatura, en la etapa inicial que consta de 2100 s (35 min) el aluminio llega desde su estado sólido y a temperatura ambiente hasta el límite en donde comienza el cambio de estado, la segunda etapa se visualiza la estabilización de temperatura; debido a que el cambio de estado se produce a temperatura constante, finalmente la tercera etapa esta definida por cambio de temperatura en un espacio de tiempo más largo.

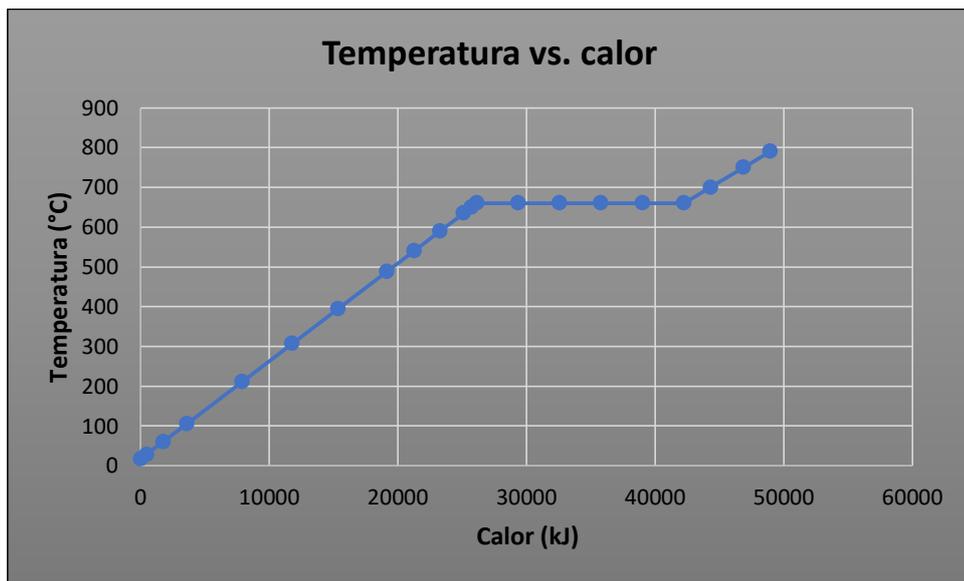


Figura 3. 2 Gráfica Temperatura vs. calor.

La figura 3.2, se puede visualizar la variación de temperatura en función del calor que se otorga al proceso de fundición y de la misma forma que en la figura 3.1 existen tres etapas definidas, en donde existe variación de temperatura cuando no hay cambio de estado, por otro lado, la temperatura permanece constante cuando el metal cambio su estado de sólido a líquido.

3.2. Cálculo de las pérdidas de energía por transferencia de calor

Una vez que se ha determinado el calor necesario para llevar al metal desde su estado sólido al estado líquido, y además, que haya llegado a la temperatura de colada, es imperativo realizar el cálculo de pérdidas de calor a través de las paredes circulares, cubierta y piso del horno; para esta finalidad es indispensable utilizar la expresión (2.19), en donde se harán ciertas consideraciones tales como: la

resistencia térmica de cada una de las capas que contiene el horno de fundición, los coeficientes de transferencia de calor convectivos interno y externo, los que son calculados bajo la consideración de convección natural.

Sin embargo, por la extensión de la formula se desarrolla el cálculo por partes, de manera preliminar se determina la resistencia térmica de las tres capas del horno de fundición.

Tabla 3. 2. Resistencias térmicas en las paredes cilíndricas.

Descripción	Resultado	Ecuación
Resistencia térmica de la primera capa, ladrillo refractario. $R_{cond. 1}$	$0.04224 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.6)
Resistencia térmica de la segunda capa, lana de vidrio. $R_{cond. 2}$	$0.7341 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.7)
Resistencia térmica de la tercera capa, lámina metálica de acero. $R_{cond. 3}$	$0.000016 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.8)

La conductividad térmica de las capas, se encuentra en el anexo 6 y 7.

Luego de haber obtenido las resistencias térmicas por conducción, se procede a determinar los coeficientes de transferencia de calor convectivos y posteriormente establecer las resistencias térmicas por convección, el primer coeficiente convectivo, es el referente al producido en la parte interna del horno; y debido a que la temperatura de la superficie interna del horno es similar a la temperatura del fluido adyacente, la transferencia de calor por convección desde el interior del horno de fundición hacia el ladrillo refractario es insignificante.

Tabla 3. 3. Resistencia térmica por convección en el exterior del horno.

Descripción	Resultado	Ecuación
Temperatura de película. T_f	43.5 °C	(2.11)
Número de Grashof. Gr_L	6.1386×10^9	(2.12)
El cilindro vertical puede tratarse como una placa vertical. $D \geq \frac{35 \cdot L}{Gr_L^{1/4}}$	$1.04 \geq 0.115$	(2.13)
Número de Rayleigh. Ra_L	4.4474×10^9	(2.14)
Número de Nusselt.	186.296	(2.15)
Coefficiente de transferencia de calor por convección. h_2	$5.099 \frac{W}{m^2 \text{ } ^\circ C}$	(2.16)
Resistencia térmica por convección del fluido externo.	$0.06225 \frac{^\circ C}{W}$	(2.10)

De la misma forma, en que se determina las resistencias térmicas por conducción y convección en las paredes del horno, se realiza para la cubierta y el piso, cabe recalcar, que estas superficies están compuestas por dos capas; una de ladrillo refractario y otra de lámina de acero, lo que provoca que las pérdidas de calor sean mayores en estos sectores del horno de fundición, esto se demuestra en la tabla 3.7 y la tabla 3.8.

En la tabla 3.4 y en la tabla 3.5 se determina las resistencias térmicas por convección y conducción de la cubierta y el piso del horno respectivamente.

Tabla 3. 4. Resistencias térmicas en la cubierta del horno

Descripción	Resultado	Ecuación
Resistencia térmica de la primera capa, ladrillo refractario. $R_{cond. 1}$	$0.15466 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.6)
Resistencia térmica de la segunda capa, lámina metálica de acero. $R_{cond. 2}$	$0.0001452 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.7)
Resistencia térmica por convección del fluido externo. $R_{conv. 2}$	$0.0488 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.10)

Tabla 3. 5. Resistencias térmicas en el piso del horno

Descripción	Resultado	Ecuación
Resistencia térmica de la primera capa, ladrillo refractario. $R_{cond. 1}$	$0.09278 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.6)
Resistencia térmica de la segunda capa, lámina metálica de acero. $R_{cond. 2}$	$0.00005125 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.7)
Resistencia térmica por convección del fluido externo. $R_{conv. 2}$	$0.0355 \frac{^{\circ}C}{W}$	(2.10)

Una vez determinadas las resistencias térmicas por convección y conducción, se procede a calcular la transferencia de calor en el horno de fundición, partiendo por el cálculo de la pérdida de calor por las paredes cilíndricas del horno.

Tabla 3. 6. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación en las paredes del horno.

Descripción	Resultado	Ecuación
Transferencia de calor por conducción y convección. $\dot{Q}_{\text{conv-cond}}$	0.3374 kW	(2.18)
Transferencia de calor por radiación. \dot{Q}_{rad}	1.2908 W	(1.3)
La transferencia de calor total al ambiente por las paredes $\frac{\dot{Q}_{\text{conv-cond}}}{\text{rad}}$	0.3386 kW	(2.19)

Tabla 3. 7. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación en la cubierta del horno.

Descripción	Resultado	Ecuación
Transferencia de calor por conducción y convección. $\dot{Q}_{\text{conv-cond}}$	1.389 kW	(2.18)
Transferencia de calor por radiación. \dot{Q}_{rad}	0.07269 W	(1.3)
La transferencia de calor total al ambiente por las paredes $\frac{\dot{Q}_{\text{conv-cond}}}{\text{rad}}$	1.4616 kW	(2.19)

Tabla 3. 8. Transferencia de calor por conducción, convección y radiación en el piso del horno.

Descripción	Resultado	Ecuación
Transferencia de calor por conducción y convección. $\dot{Q}_{\text{conv-cond}}$	2.205 kW	(2.18)
Transferencia de calor por radiación. \dot{Q}_{rad}	0.3976 W	(1.3)
La transferencia de calor total al ambiente por las paredes $\frac{\dot{Q}_{\text{conv-cond}}}{\text{rad}}$	2.6026 kW	(2.19)

Una vez que se han determinado los valores de pérdida de energía por transferencia de calor en conducción, convección y radiación, se puede observar que las pérdidas de calor por este motivo son en realidad pequeñas en comparación con lo que se perderá por gases de combustión, para visualizar de mejor manera las pérdidas de calor se coloca la figura 3.3; en donde, se representa que la transferencia de calor en las paredes es menor a las de la cubierta y el piso, esto debido a que, estas superficies no tienen la capa intermedia de lana de vidrio, como si poseen las paredes cilíndricas del horno de fundición de aluminio.

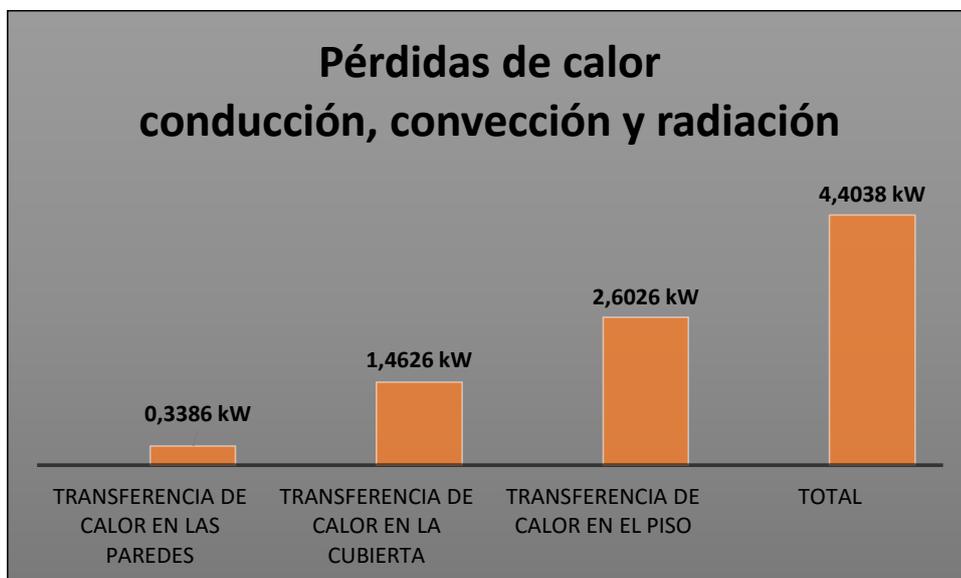


Figura 3. 3 Gráfica de pérdidas de energía por transferencia de calor.

3.2.1 Simulación del proceso de transferencia de calor con ANSYS

Después de haber determinado la transferencia de calor que se produce desde el interior del horno de fundición de aluminio de forma tradicional, se realiza una modelación de este proceso, utilizando para ello el software ANSYS, una vez que se ha hecho este procedimiento se puede observar que la transferencia de calor es mínima debido la segunda capa que está hecha de un material aislante, lo que provoca que la temperatura exterior de la última capa es relativamente baja, como se puede visualizar en la figura 3.4.

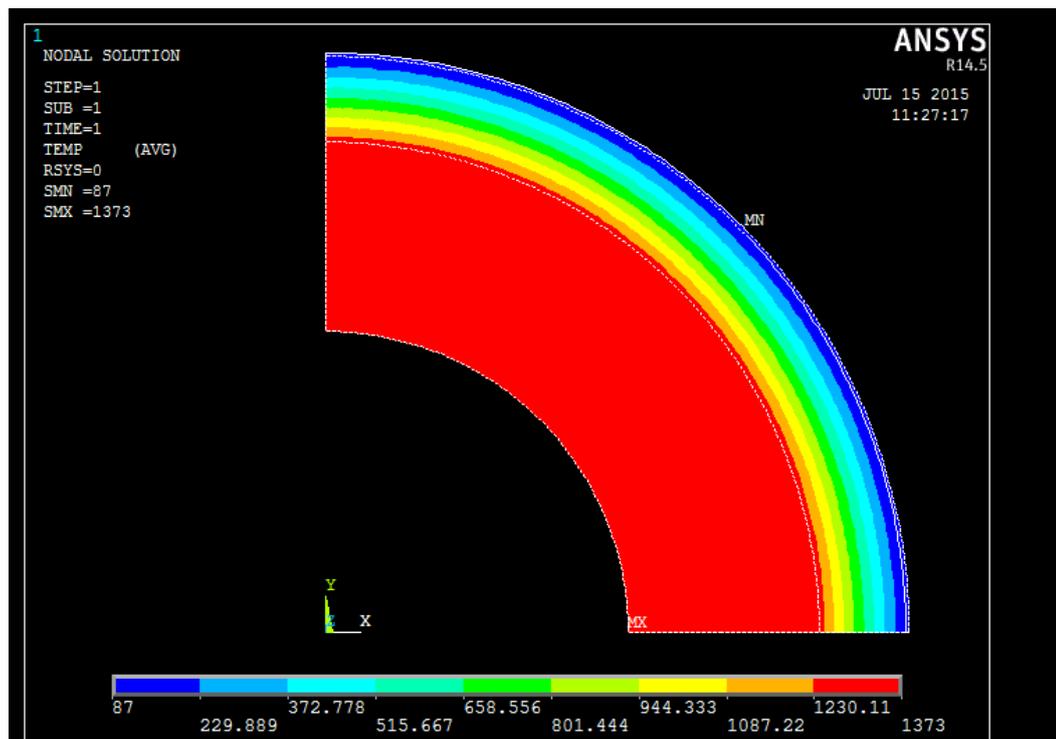


Figura 3. 4 Simulación de la transferencia de calor.

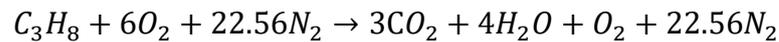
3.3. Cálculo de la pérdida de energía por gases de combustión

Para obtener la eficiencia del horno de fundición de aluminio hay que determinar, el calor entregado al proceso de fundición, en este caso por el combustible gaseoso, gas licuado de petróleo, que es una mezcla entre dos gases; propano y butano, en porcentajes del 60 y 40 respectivamente.

Por esta razón es indispensable establecer la reacción química de la combustión estequiométrica, sin embargo para que la combustión se realice en perfectas condiciones se le añadirá un 20 % de aire al proceso de combustión.

Se determina la reacción química para el propano y butano de forma separada, como se indica en las ecuaciones (2.23) y (2.24).

Propano:



Butano:



Para determinar el poder calorífico inferior del combustible, es necesario recurrir a la ecuación (2.26).

Tabla 3. 9. Poder calorífico del propano.

Propano C_3H_8	
$3CO_2 + 4H_2O + O_2 + 22.56N_2$	
Poder calorífico inferior	$46352.1 \frac{kJ}{kg}$
Poder calorífico superior	$50344.2 \frac{kJ}{kg}$

Tabla 3. 10. Poder calorífico del butano.

Butano C_4H_{10}	
$4CO_2 + 5H_2O + 1.3O_2 + 29.33N_2$	
Poder calorífico inferior	$45713.9 \frac{kJ}{kg}$
Poder calorífico superior	$49499.9 \frac{kJ}{kg}$

El poder calorífico del gas licuado de petróleo es la suma del gas propano y butano, con sus respectivos porcentajes como ya se indicó anteriormente.

Tabla 3. 11. Poder calorífico del gas licuado de petróleo.

Gas licuado de petróleo (GLP)	
$GLP = C_3H_8 \cdot 0.6 + C_4H_{10} \cdot 0.4$	
Poder calorífico inferior	$46096.8 \frac{kJ}{kg}$
Poder calorífico superior	$50006.5 \frac{kJ}{kg}$

Otro aspecto importante para determinar la eficiencia del horno es determinar la relación aire combustible. Para ello se utiliza la ecuación (2.28), y la tabla 2.1.

Tabla 3. 12. Relación aire combustible Gas licuado de petróleo.

Combustible	Relación aire/combustible $r_{a/c}$
Propano.	$18.816 \frac{kg_{aire}}{kg_{C_3H_8}}$
Butano.	$18.552 \frac{kg_{aire}}{kg_{C_4H_{10}}}$
Gas licuado de petróleo.	$18.7104 \frac{kg_{aire}}{kg_{GLP}}$

Para determinar la pérdida de energía provocada por la combustión de gas licuado de petróleo y aire con un exceso del 20 %, es necesario definir una ecuación de balance de energía para procesos de flujo estable, en donde se tiene la energía proveniente del combustible y el aire como entradas de energía, y los gases de combustión, la energía necesaria para fundir el aluminio y la energía que se pierde por transferencia de calor por medio de las paredes del horno, como salidas de energía.

Aplicando la primera ley de la termodinámica o principio de conservación de energía se establece el siguiente balance:

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} = \frac{\partial m_{vc}}{\partial t} \quad (\text{Ecu. 3.1})$$

Donde:

$\sum \dot{E}_{in}$: sumatorio de energías que ingresan al sistema, (kJ/s).

$\sum \dot{E}_{out}$: sumatorio de energías que salen del sistema, (kJ/s).

$\frac{\partial m_{vc}}{\partial t}$: variación de la masa que se encuentra en el sistema con relación al tiempo, (kJ/s).

El sistema de análisis, en el proceso de combustión es un sistema abierto de flujo estable, la variación de la masa con relación al tiempo es cero, debido a que esta no cambiará por ninguna razón.

El consumo de combustible, para fundir 45 kg de aluminio en aproximadamente una hora, es de un cilindro de 45 kg.

Tabla 3. 13. Energías que ingresan al sistema de combustión.

Denominación	Formula	Valor	Ecuación
Energía del combustible E_c	$E_c = \dot{m}_c \cdot PCI$	576.21 kW	(Ecu. 3.2)
Energía del aire E_a	$E_a = \dot{m}_a \cdot h_{t\ amb}$	67.862 kW	(Ecu. 3.3)
Energía total de entrada		644.072 kW	

Las salidas de energía son las ya descritas con anterioridad y están demostradas en la tabla 3.14. En donde se necesita determinar la energía que se sale por medio de los gases de combustión, así como el flujo másico de estos.

Tabla 3. 14. Energías que salen del sistema de combustión.

Denominación	Formula	Valor	Ecuación
Energía del proceso de fusión de aluminio.		41.515 kW	(2.4)
Energía perdida en las paredes, piso y cubierta por transferencia de calor		4.4038 kW	Figura 3.4
Energía que se pierde por gases de combustión.	$E_g = \dot{m}_g \cdot C_{p_g} \cdot (T_g - T_{amb})$	598.153 kW	(3.4)
Energía total de salida		644.072 kW	
Flujo másico de los gases de combustión.	\dot{m}_g	$2.011 \frac{kg}{s}$	

Como se ha recalado durante toda la investigación la mayor cantidad de pérdidas de calor, son las producidas por los gases de combustión lo que provocan la baja eficiencia del horno de fundición tipo crisol. Esto se puede visualizar en la figura 3.5, que representa las pérdidas de energía.

Además es importante aclarar que el calor que escapa, debido al proceso de combustión, puede ser reutilizado en otro proceso o subproceso relacionado con la fusión de metales, o a su vez puede ser usado en otra aplicación en el interior del Laboratorio de Ingeniería Mecánica o afines.

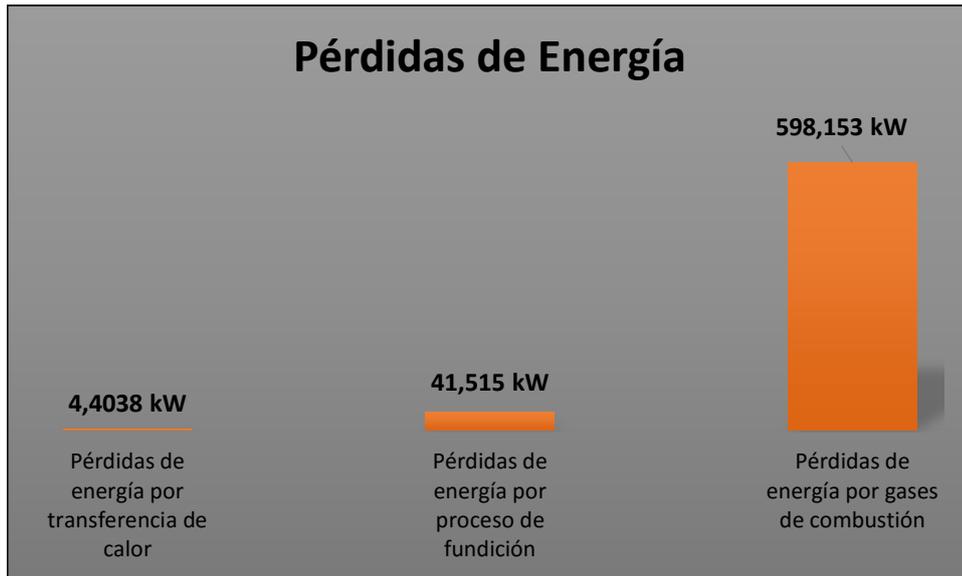


Figura 3. 5 Pérdidas de energía en el proceso de fundición de aluminio.

3.4. Cálculo de la eficiencia térmica del horno de fundición

La eficiencia del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad politécnica Salesiana, es uno de los parámetros importantes en la presente investigación, por lo que es necesario determinar su valor, para que, bajo determinadas reformas a los parámetros operacionales esta eficiencia térmica aumente, para calcularla se recurre a la ecuación (2.30).

Tabla 3. 15. Eficiencia térmica del horno de fundición.

Eficiencia térmica	
Concepto	Valor
Flujo másico, \dot{m}	$45 \frac{kg_{GLP}}{h}$
Poder calorífico inferior.	$46096.8 \frac{kJ}{kg}$
Energía de entrada.	$644.072 kW$
Eficiencia térmica.	$0.06455 = 6.445 \%$

Finalmente se puede decir que la eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, es baja, por lo que es imperativo tratar de mejorar esta eficiencia en post de la vida útil del horno, beneficio económico y ambiental.

No obstante la eficiencia en hornos de tipo crisol es baja, para ello es necesario tener cuenta los promedios de eficiencia térmica en los diferentes tipos de hornos de fundición, en la tabla 3.16 se puede visualizar esto.

Tabla 3. 16. Eficiencia térmica en hornos de fundición.

Tipo de horno	Gas	Eléctrico	Eficiencia térmica	Valoración
Crisol	x		7 – 19 %	Pobre
Cúpula	x		40 – 50 %	Buena
Reverbero	x		30 – 45 %	Regular a bueno
Rotatorio	x		35 %	Regular
Arco directo		x	35 – 45 %	Regular a bueno
Inducción		x	50 – 76 %	Bueno a excelente

Fuente: (Jost, 2011)

3.5. Análisis del consumo de gas licuado de petróleo

Según la Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero (ARCH), gran parte de consumo de gas licuado de petróleo es proveniente del sector doméstico mediante cilindros de 15 kg, a pesar de esto el consumo que se realiza en la Universidad Politécnica Salesiana para el funcionamiento adecuado del horno de fundición es a través de cilindros de 45 Kg de uso industrial.

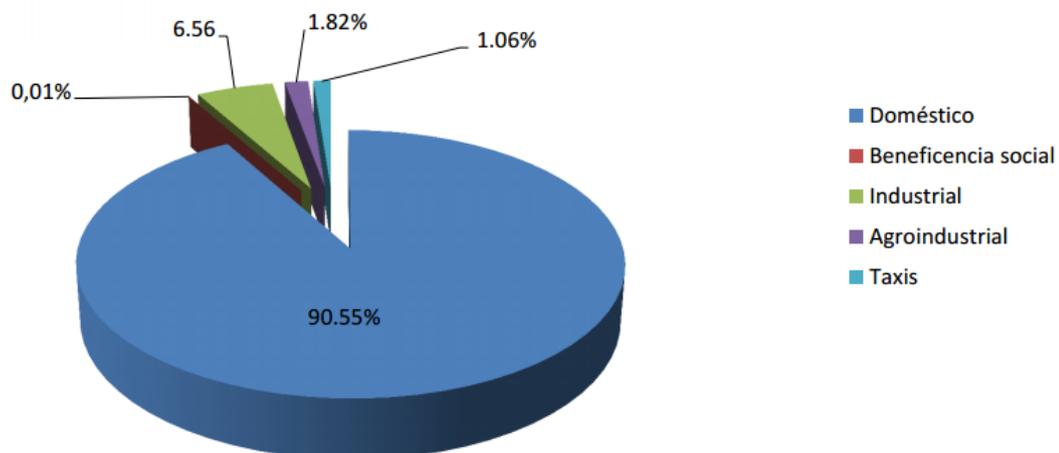


Figura 3. 6 Sectores de consumo de gas licuado de petróleo.

Fuente: (Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero, 2014)

La adquisición de gas licuado de petróleo se la realiza al inicio de cada semestre académico por medio del jefe de los Laboratorios de Ingeniería Mecánica, el consumo económico por la compra de este combustible industrial, se lo detalla en la tabla 3.17.

Tabla 3. 17. Gasto económico por consumo de gas licuado de petróleo.

Descripción	Cantidad de cilindros	Valor de compra por cilindro (USD)
Cilindro de gas licuado de petróleo de 45 kg	4	50.40
Total de gasto económico semestral		201.6

3.6. Análisis del consumo de electricidad

Para determinar el consumo de energía eléctrica en el proceso de fundición de aluminio dentro de la Universidad Politécnica Salesiana, es necesario conocer las tarifas de consumo de electricidad impuestas por la Empresa Eléctrica Quito, tanto a nivel residencial como a nivel industrial.

Es necesario explicar que además de combustible el horno de fundición contiene un ventilador, el que proporciona el aire necesario para realizar la combustión, este ventilador funciona mediante energía eléctrica con un voltaje de 220 V, es por ello que se realiza un análisis del consumo de electricidad.

El gasto por energía eléctrica se determina con la tarifa comercial de 0.104 USD/kWh, esto debido a que el consumo de la Universidad Politécnica Salesiana es superior a los 301 kWh/mes, por lo que se calcula el valor a pagar en el proceso de fundición de aluminio, nuevamente se recalca que la frecuencia de uso del mismo es de ocho veces al año, seis de ellas son prácticas estudiantiles y las restantes dos son utilizadas para mantenimiento.

Tabla 3. 18. Tarifas de consumo aplicadas por la Empresa Eléctrica Quito.

Tarifa residencial para baja y media tensión	
Rangos de consumo (kWh)	Cargos tarifarios (USD)
0 - 50	0.0784
51 - 100	0.0814
101 - 150	0.0834
151 - 200	0.0904
201 - 250	0.0974
251 - 500	0.0994
501 - 700	0.1285
701 - 1000	0.1450
1001 - 1500	0.1709
1501 - 2500	0.2752
2501 - 3500	0.4360
3501 y superior	
Comercial - Industrial	
0 - 300	0.081
301 - superior	0.104

Fuente: (Empresa Eléctrica Quito, 2015)

Tabla 3. 19. Gasto económico por consumo de electricidad.

Mes del año 2015	Consumo de electricidad (kWh)	Tarifa aplicada a la Universidad Politécnica Salesiana (USD/kWh)	Costo por consumo de electricidad. (USD)
Abril	5500	0.104 Ver anexo 12	572
Mayo	5520		574.08
Junio	6010		625.04
Julio	5000		520
Total de gasto económico semestral			2291.12

3.7. Análisis ambiental del proceso de fundición

Durante el proceso de fundido, la emisión de materia particulada (MP) en forma de polvo y humos provenientes de la combustión, varía en función del tipo de horno, combustible, metal a fundir y propiedades de fusión. Los hornos de crisol son los que generan en gran medida humos de combustión. Los índices más bajos de emisiones se asocian con otros tipos de hornos de fusión, especialmente los hornos de inducción.

Existen varias técnicas ya estudiadas de cómo reducir la contaminación ambiental en el proceso de fundición de metales, las que se detallan a continuación:

- ✓ Siempre que sea posible, utilizar los hornos de inducción;
- ✓ Implementar tecnologías en hornos de fusión que permitan reducir el consumo de energía (instalación de quemadores de gas licuado de petróleo o la inyección de oxígeno cuando sea necesario);
- ✓ Instalar campanas de extracción de gas en los hornos de crisol, que faciliten la captura de hasta el 90 por ciento de los gases de combustión procedentes de los hornos.

El proceso de fundición es intensivo en términos de energía y constituye una fuente significativa de emisiones de dióxido de carbono (CO₂), principalmente ligadas a la combustión de carburante.

Las técnicas recomendadas para prevenir y controlar las emisiones de dióxido de carbono (CO₂) incluyen:

- ✓ Limitar el consumo de energía y aumentar la eficiencia energética mediante medidas básicas que incluyan, entre otras:
 - Aislar adecuadamente las superficies para limitar la dispersión del calor;
 - Controlar un coeficiente adecuado de aire/combustible para reducir el exceso de O₂;
 - Implementar sistemas de recuperación de calor;
 - Aprovechar las propiedades térmicas del gas residual mediante un intercambiador de calor para producir agua, aire y/o vapor calientes.

- ✓ Implementar las mejores técnicas de combustible disponibles (p. ej. la sobreoxigenación del aire forzado, el precalentamiento de la carga y el control automático de los parámetros de combustión);
- ✓ Implementar prácticas operativas y de mantenimiento de los equipos y evitar la carga parcial de los mismos;
- ✓ Reducir el consumo de combustible durante el calentamiento de las cucharas y el tratamiento térmico de los metales fundidos mediante la recuperación de gas y / o los controles de combustión;
- ✓ Seleccionar combustibles con un menor coeficiente de contenido en carbono y valor calorífico.

Por otra parte, existe otro efecto en la contaminación ambiental que es; la gran cantidad de arena empleada en el fundido en moldes no recuperables, lo que genera emisiones de polvo durante las distintas fases de moldeo y produce partículas no metálicas, partículas de óxido metálico y hierro metálico. Las partículas no metálicas resultan de los procesos de fundición, desmolde y acabado (Corporación Financiera Internacional, 2007).

3.8. Conclusiones del capítulo

- ✓ La eficiencia térmica en el horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, es del 6.44 % que, a pesar de ser baja, está en los rangos adecuados para este tipo de horno.
- ✓ Mediante el análisis ambiental que se realizó, se pueden establecer parámetros para reducir la contaminación ambiental en el interior y los alrededores del Laboratorio de Fundición, y mediante un sistema de extracción de gases calientes se captará cerca del 90 % de estos gases.

CAPÍTULO IV

PROPUESTA DE REFORMAS TÉCNICAS Y EXTRACCIÓN DE CALOR EN EL HORNO DE FUNDICIÓN DE ALUMINIO

La propuesta del tema de investigación se fundamenta en establecer reformas técnicas en el horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, basado en el diseño de una campana de extracción de gases calientes, que permita mejorar la eficiencia del mismo.

4.1. Título de la propuesta

Establecimiento de reformas técnicas para el horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy.

4.2. Justificación

Los laboratorios de la Carrera de Ingeniería Mecánica en su aspiración por mejorar y elevar la calidad de enseñanza, hace aproximadamente dos años, implementó el horno de fundición de metales tipo crisol, sin embargo el funcionamiento actual de este no es el adecuado, ya que posee diversos defectos de funcionamiento, por lo que es necesario establecer reformas técnicas en su utilización.

Las reformas técnicas constan de varias mejoras en los parámetros operacionales del horno como: establecer la posición y lugar adecuado para el funcionamiento del horno de fundición, diseñar una campana de extracción de gases calientes que son producidos por el proceso de combustión y analizar el posible direccionamiento de estos gases hacia otro proceso mediante un intercambiador de calor.

4.3. Objetivo

Mejorar los parámetros operacionales del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, sede Quito, campus Kennedy.

4.4. Estructura de la propuesta

El horno de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana es un equipo que funciona esporádicamente, a pesar de esto es indispensable, que este funcione en condiciones aceptables, además el horno de fundición es utilizado exclusivamente para el aprendizaje en el proceso de fundición, por lo que es necesario establecer ciertas reformas tales como: mejorar los parámetros operacionales, establecer el diseño de una campana de extracción de gases y orientar el análisis de un proceso adecuado del uso de estos gases.

4.4.1 Mejoramiento de los parámetros operacionales

La manipulación adecuada de un horno de fundición de metales depende de algunos factores como; la operación, ubicación, entre otros, es por estas razones, que se necesita implementar mejoras operacionales.

El horno de fundición de aluminio tipo crisol que la Universidad Politécnica Salesiana posee; es de la categoría TB 10/14 de la fábrica alemana Nabertherm, debido a condiciones ajenas a los directivos del centro de estudios superiores, el horno debe estar colocado en espacio reducido y en condiciones riesgosas para el aprendizaje, por lo que es obligatorio ubicarlo en un lugar ideal para su funcionamiento.

Como un parámetro fundamental para el mejoramiento del horno de fundición, es que este, tiene que estar colocado en un sitio adecuado, el fabricante recomienda que el espacio mínimo para la operación sea de 100 m², esta consta de las secciones para fundición, moldeado, abastecimiento de combustible y depósito de materiales y accesorios, además que la altura varíe entre los 4 a 5 m, desafortunadamente en las condiciones actuales solo se cumple con la altura debido a que el área para la operación es de 35 m², por lo se propone el arreglo mostrado en la figura 4.1, en

donde se detallan las secciones que debe contener el Laboratorio de Fundición, esto cumpliendo con los requerimientos mínimos recomendados por el fabricante del horno de fundición y, así garantizar todas la medidas de seguridad durante la operación del mismo.

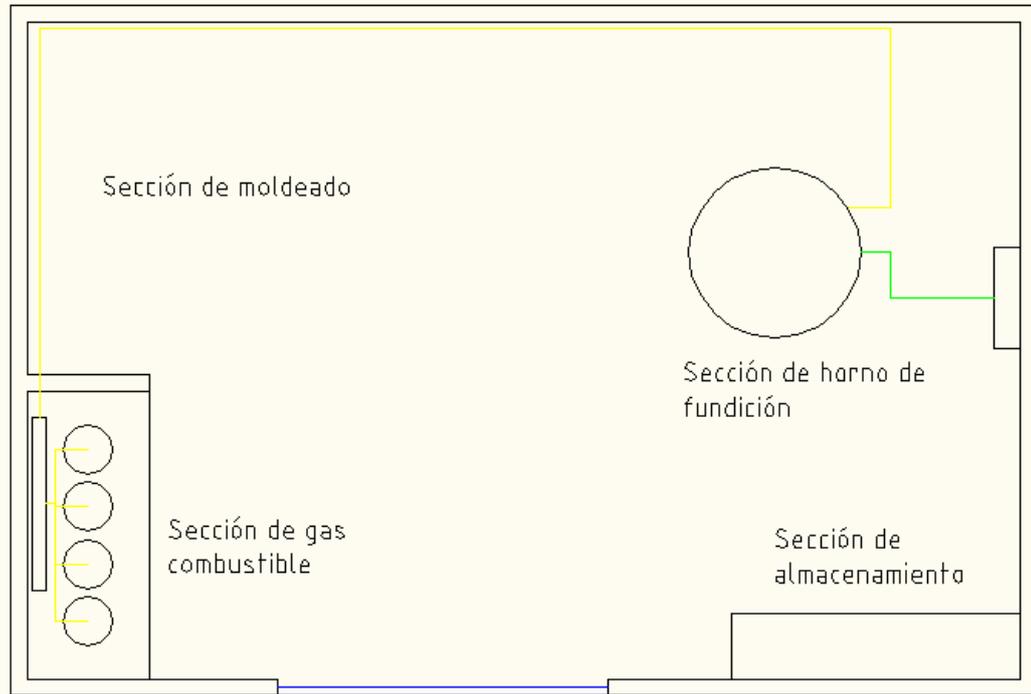


Figura 4. 1. Implantación del Laboratorio de Fundición.

Otro aspecto importante de la ubicación del horno es que, este debe estar semi cubierto o hasta una altura a la que permita al operador del equipo trabajar de manera apropiada, en otras palabras, que no tenga obstáculos durante el proceso de extracción del metal fundido y transportarlo hacia los moldes de arena mediante accesorios para este fin, denominados *cucharas*, a pesar de esta recomendación el horno posee, actualmente, dos gradas metálicas, como se aprecia en la figura 4.2, esta configuración de extracción del metal fundido podrían ocasionar accidentes graves tanto para los estudiantes, docentes y operarios del horno de fundición. Lo que a largo plazo ocasionará problemas ergonómicos y de salud ocupacional en operarios y docentes. Además de mejorar la ergonomía en la extracción del metal fundido, existe otro beneficio al cubrir de manera parcial o total el horno de fundición, que es la de reducir pérdidas de energía por transferencia de calor hacia el medio adyacente por las paredes y piso, con esto se mejora la eficiencia del

mismo, además se reducen los gastos por consumo de gas licuado de petróleo como de energía eléctrica. La reducción de pérdidas es aproximadamente el 10 % de la energía desperdiciada en estos sectores del horno de fundición.



Figura 4. 2. Ubicación actual del horno de fundición de aluminio.

4.4.2 Diseño de una campana de extracción de calor

Los sistemas de extracción son ampliamente utilizados para la extracción de gases calientes que provienen de diversas operaciones industriales.

La forma más adecuada de conducir los gases calientes es captarlo en la proximidad inmediata del horno acudiendo a la llamada, extracción localizada, esto se hace mediante campanas de extracción.

Para el diseño del sistema de extracción, más apropiado y que más se adapte al horno de la Universidad, se propone la extracción localizada la que incluye; un sistema de captación de gases y los conduzca hacia otro lugar donde no constituyan

un problema y colaboren en otro proceso adyacente o no al de fundición. Parte de este sistema son las campanas extractoras, que no es nada más que un sistema diseñado para recoger, recolectar y remover humos, polvos, vapores, calor y gases con la finalidad de proteger la salud y seguridad industrial de los estudiantes, laboratoristas y docentes, que utilizan este equipo.

Esencialmente un sistema de extracción localizada se compone de tres partes:

- ✓ Un elemento de captación (habitualmente llamado campana que, situado en las cercanías del horno de fundición, es el responsable de atrapar los gases calientes),
- ✓ Un ventilador, que es el responsable de poner el aire en movimiento, y
- ✓ Un conducto que une el ventilador y la campana de extracción.

En el anexo 18 se visualiza la gran variedad de campanas de extracción de calor y gases provenientes de hornos de fundición.

Las campanas con formas de pabellón tienen estar ubicadas en la parte superior del horno y debido a esto la campana, tipo pabellón, requiere mayor volumen de aire para mantener y recolectar los gases calientes, el diseño de esta no afecta o interfiere con la metalurgia del horno.

Para el caso particular del horno de fundición de la Universidad Politécnica Salesiana al no poseer equipos que se encuentren por encima de este, la campana de extracción debe colocarse lo más cerca posible con la finalidad de captar la mayor cantidad de gases, sin olvidarse de dejar la distancia apropiada para el trabajo adecuado del operario, laboratorista, docente o estudiante.

En la figura 4.4 se puede apreciar las distancias referenciales, que debe que poseer la campana de extracción tipo pabellón, seleccionada para el horno de fundición.

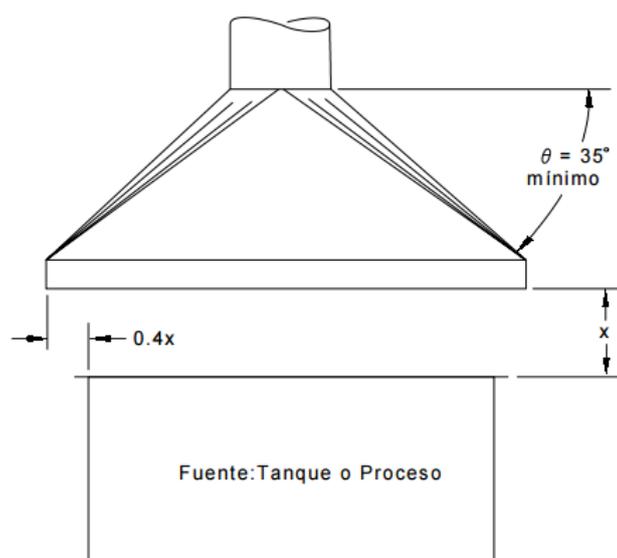


Figura 4. 3 Distancias referenciales de la campana de extracción tipo pabellón.

Fuente: (ACGIH, 2007)

Una vez establecidas las distancias referenciales, mediante la figura 4.3 se puede obtener las distancias adecuadas de la campana de extracción, para esto hay que tener en cuenta las dimensiones del horno de fundición.

Tabla 4. 1. Distancias adecuadas de la campana de extracción.

Distancias adecuadas de la campana de extracción		
Denominación	Dimensión	Unidad
Diámetro del horno de fundición.	1.04	m
Altura del horno de fundición.	0.92	m
Distancia entre el horno y la campana de extracción (x)	1.25	m
Longitud de la campana (lado)	2.04	m
Angulo de inclinación θ	47.25	grados

Mediante las distancias citadas en la tabla 4.1, se puede determinar el área y el volumen necesario para la extracción de gases proveniente del horno de fundición, así como el caudal y la velocidad.

Para realizar este tipo de evacuación se propone instalar un ventilador (extractor), dispuesto según las necesidades del laboratorio, que sea capaz de extraer el aire

necesario desde el interior y expulsarlo al exterior, además, que la velocidad de captura, sea la velocidad en m/s necesaria para extraer los gases calientes. Las velocidades que se usan habitualmente para la eficiente captura de estos se enlistan en la tabla 4.2.

Tabla 4. 2. Velocidades mínimas de captura.

Características de la fuente de contaminación	Velocidad mínima de captura (m/s)	Proceso
Desprendimiento con velocidades casi nulas y aire quieto	0.25 – 0.5	Evaporación, descarga que proviene de lavado, desengrasado, soldadura, enchapado.
Desprendimiento a baja velocidad en aire tranquilo	0.5 - 1	Spray de pintura en cabinas, inspección, orden, pesaje, embalaje, mezcla, velocidades bajas (menos de 1 m/s)
Generación activa en zonas de movimiento rápido de aire.	1 – 2.5	Tamizado, fundición, trituradoras; alta velocidad (por encima de 1 m/s)
Desprendimiento a alta velocidad en zonas de muy rápido movimiento de aire.	2.5 - 10	Molienda, limpieza abrasiva, esmerilado, rectificado

Fuente: (Soler & Palau, 2012)

El caudal necesario de aire a extraer desde el Laboratorio de fundición hacia el intercambiador de calor, se determina mediante la ecuación 4.1, obtenida del anexo 21.

$$Q_a = 3600 L \cdot V \cdot H \quad (\text{Ecu. 4.1})$$

Donde:

Q_a : caudal de aire a extraer, (m³/s).

L : lado de la campana, (m).

V : velocidad de extracción, (m/s).

H : altura de operación hasta la campana, (m).

$$Q_a = 3600 \cdot 2.04m \cdot 1m/s \cdot 1.25m$$

$$Q_a = 9180 \text{ m}^3/\text{h}$$

$$Q_a = 2.55 \text{ m}^3/\text{s}$$

Dimensionamiento de los ductos de extracción.

Con el caudal determinado anteriormente se procede al dimensionamiento de los ductos, los mismos deben evacuar los gases provenientes del horno.

El caudal que circula por el ducto, conjuntamente con la velocidad de circulación están unidos por la siguiente expresión:

$$Q_a = S \cdot V_t \quad (\text{Ecu. 4.2})$$

Donde:

S : área de sección de paso, (m²).

V_t : velocidad de transporte, (m/s).

Para determinar la velocidad de transporte, se toma en cuenta los datos descritos en la tabla 4.1, la misma que indica las velocidades en dependencia del fluido que se requiere transportar por el ducto.

La velocidad de transporte para los gases producidos durante el proceso de fundición es de 10 m/s, por lo tanto se calcula el área del ducto para la extracción de estos gases.

$$S = \frac{Q_a}{V_t}$$

$$S = \frac{2.55 \text{ m}^3/\text{s}}{10 \text{ m/s}}$$

$$S = 0.255 \text{ m}^2$$

Con el valor de la sección calculada anteriormente, se determina el diámetro para los ductos, este es de 0.569 m.

Tabla 4. 3. Velocidades de transporte en los ductos.

Contaminante	Aplicaciones específicas	Velocidades (m/s)
Gases y vapores	Vapor de agua	5 a 6
Humos	Humos de óxido de zinc y de aluminio.	7 a 10
Polvos muy ligeros	Felpas muy finas de algodón.	10 a 13
Polvos secos y pólvoras	Polvos finos de caucho, de baquelita; felpas de yute; polvos de algodón, de jabón.	13 a 18
Polvos industriales medios	Abrasivo de lijado en seco; polvos de amolar; polvos de yute, de grafito; corte de briquetas, polvos de arcilla, de calcáreo; embalaje o pesada de amianto en las industrias textiles.	18 a 20
Polvos pesados	Polvo de toneles de enarenado y desmoldeo, de chorreado, de escariado.	20 a 23
Polvos pesados o húmedos	Polvos de cemento húmedo, de corte de tubos de amianto-cemento, de cal viva.	> 23

Fuente: (Soler & Palau, 2012)

Cuando el aire fluye por un ducto, admite una pérdida de energía que se manifiesta con la reducción de presión. Esta pérdida de presión es lo que se conoce con el nombre de pérdida de carga o caída de presión.

Las pérdidas de carga en el sistema de extracción de gases son:

- ✓ Pérdidas de carga en la campana.
- ✓ Pérdidas de carga en accesorios.
- ✓ Pérdidas de carga en el ducto.

En la figura 4.5 se visualiza el sistema de extracción de gases producidos por el horno de fundición, las medidas están expuestas en metros.

Para determinar la pérdida de presión en la campana y el codo, que se encuentran en el sistema de extracción, es necesario calcular la presión dinámica en este sistema con la velocidad de trabajo de 10 m/s, y mediante el anexo 16, se puede determinar esta presión, el valor obtenido es de 6 mm c.d.a. (milímetros de columna de agua).

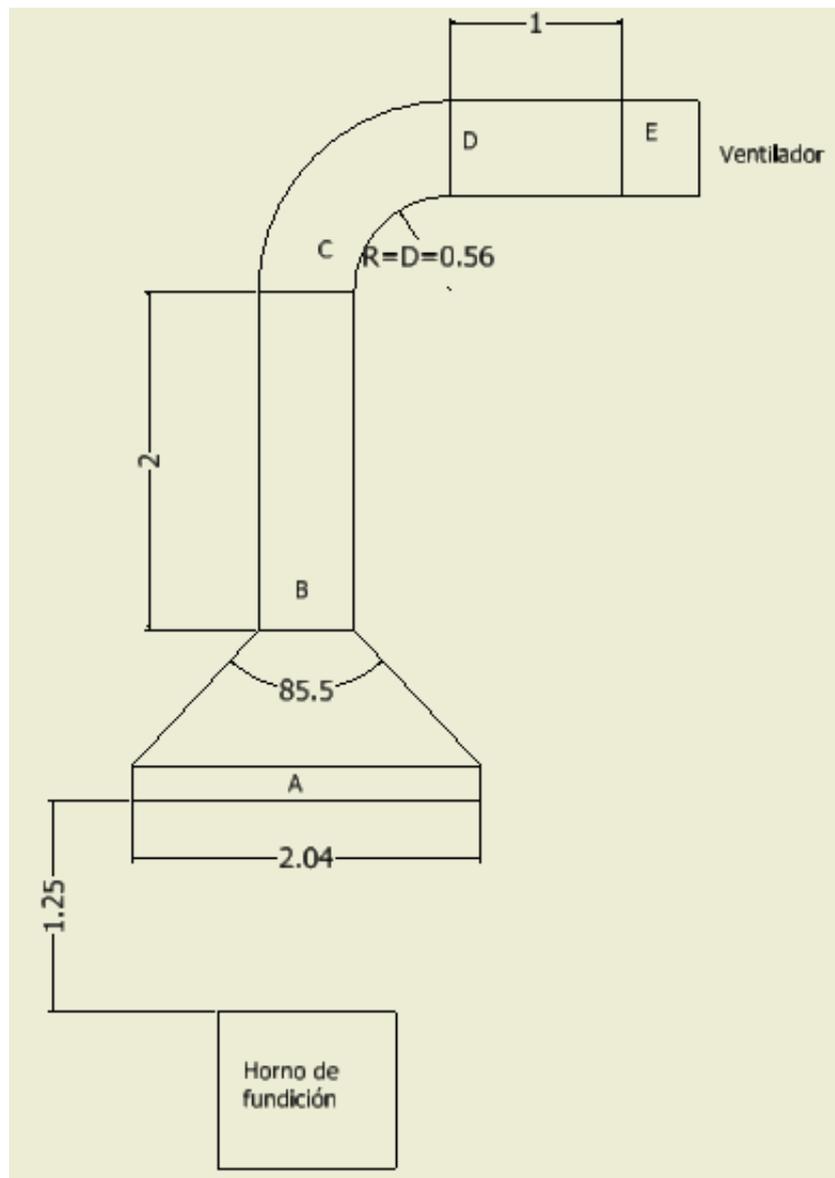


Figura 4. 4. Sistema de extracción de gases.

El valor de las pérdidas producidas por la campana en sí, es determinado a partir de la expresión 4.3.

$$\Delta P_{camp} = fc \cdot Pd \quad (\text{Ecu. 4.3})$$

Donde:

ΔP_{camp} : presión estática de la campana, (Pa).

fc : factor de pérdidas de la campana.

Pd : presión dinámica, (mm c.d.a.).

El factor de pérdidas en la campana se obtiene mediante el anexo 14, en donde, para un ducto de boca rectangular o cuadrada y un ángulo de campana de 85.5° se obtiene un factor de 0.25.

$$\Delta P_{camp} = 0.25 \cdot 6 \text{ mm c. d. a.}$$

$$\Delta P_{camp} = 1.5 \text{ mm c. d. a.}$$

De la misma manera se obtiene las pérdidas de carga en el codo, sin embargo para este caso se acude al anexo 17 para encontrar el factor de pérdidas de este codo.

$$\Delta P_{codo} = 0.2 \cdot 6 \text{ mm c. d. a.}$$

$$\Delta P_{codo} = 1.2 \text{ mm c. d. a.}$$

Para las pérdidas de carga en el ducto recto se tiene la ecuación 4.4.

$$\Delta P_{cond \text{ recto}} = fcr \cdot Lc \quad (\text{Ecu. 4.4})$$

Donde:

$\Delta P_{cond \text{ recto}}$: pérdida de carga en el ducto recto, (mm c.d.a.).

fcr : factor de pérdidas en tramos rectos, (ver anexo 15)

Lc : longitud del ducto, (m)

El factor de pérdida de carga en ductos rectos se obtiene a partir del caudal y la velocidad de transporte de aire, (anexo 15).

$$\Delta P_{cond\ recto} = 0.2 \cdot 3\ m$$

$$\Delta P_{cond\ recto} = 0.6\ mm\ c.\ d.\ a.$$

La pérdida de carga total de instalación, para evacuar los gases provocados por el proceso de fundición de aluminio, se determina con la expresión 4.5.

$$\Delta P_{total} = \Delta P_{cond\ recto} + \Delta P_{codo} + \Delta P_{camp} \quad (\text{Ecu. 4.5})$$

$$\Delta P_{total} = (0.6 + 1.2 + 1.5)\ mm\ c.\ d.\ a.$$

$$\Delta P_{total} = 3.3\ mm\ c.\ d.\ a.$$

El ventilador extractor de gases a escoger, tiene que ser capaz de transportar 9180 m³/h a través de un sistema que muestra pérdidas por caída de presión de 3.3 mm c.d.a. Este ventilador puede ser del tipo impulsor-extractor axial (tabla 4.5), con lo que se cumple con todas las condiciones de extracción y su posterior uso en un sistema de intercambio de calor.

Tabla 4. 4. Características técnicas de extractor axial tubular.

Extractor axial tubular (ver anexo 19)					
Velocidad (RPM)	Potencia (HP)	Tensión (V)	Caudal de descarga (m³/h / CFM)	Presión sonora (dB)	Peso aproximado (kg)
1300	1	230	12144 / 7130	68	48

Fuente: (Palau - Soler, 2010)

4.4.3 Análisis de intercambio de calor proveniente de los gases calientes

Un intercambiador de calor es un dispositivo diseñado para transferir calor entre dos medios, que estén separados por una barrera o que se encuentren en contacto.

Debido a la gran cantidad de energía que contienen los gases calientes provenientes del proceso de fundición, y direccionados mediante el sistema de extracción, se propone utilizar un intercambiador de calor de flujo cruzado que contiene la siguiente configuración, el fluido caliente fluye en una dirección (gases calientes) y el fluido frío (agua) que fluye en otra de forma perpendicular a la primera.

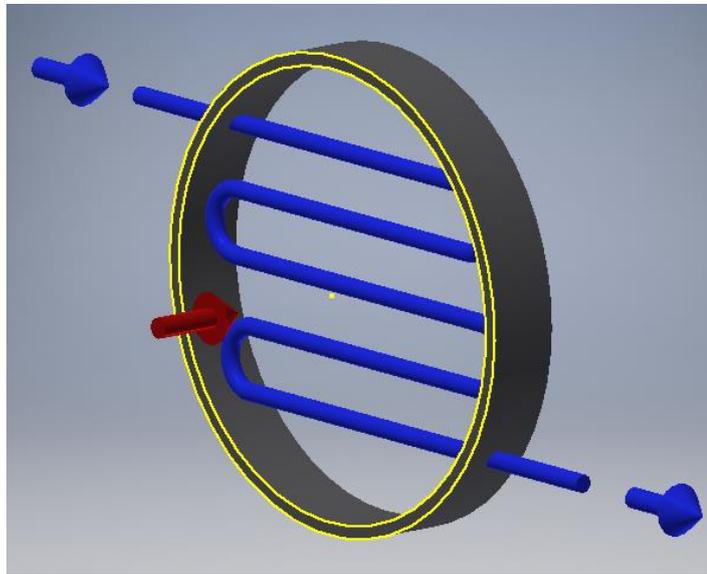


Figura 4. 5 Intercambiador de flujo cruzado.

Con el uso del intercambiador de calor de flujo cruzado se mejora la eficiencia térmica del proceso de fundición de aluminio de la Universidad Politécnica Salesiana, ya que, al utilizar los gases calientes provenientes de este proceso se transfiere esta energía hacia otro fluido, por esta razón es primordial calcular el calor que se intercambia entre estos fluidos.

Intercambio de calor entre los gases calientes y agua

Para determinar el calor que se transfiere desde los gases calientes hacia el agua se establece las siguientes ecuaciones:

$$\dot{Q}_{int} = \dot{m}_c \cdot C p_c \cdot (T c_{sal} - T c_{ent}) \quad (\text{Ecu. 4.6})$$

$$\dot{Q}_{int} = \dot{m}_h \cdot C p_h \cdot (T h_{ent} - T h_{sal}) \quad (\text{Ecu. 4.7})$$

Donde:

\dot{Q}_{int} : velocidad de transferencia de calor, (kW)

\dot{m}_c, \dot{m}_h : gastos máxicos de los fluidos frio y caliente, (kg/s)

Cp_c, Cp_h : calores específicos de los fluidos frio y caliente, (kJ/kg °C)

Tc_{sal}, Th_{sal} : temperaturas de salida del fluido frio y caliente, (°C)

Tc_{ent}, Th_{ent} : temperaturas de entrada del fluido frio y caliente, (°C)

Debido a que se posee datos del flujo de gases calientes como temperatura, caudal, densidad, se determina la velocidad de transferencia de calor para este fluido, la temperatura de entrada es de 150 °C, debido a que en el proceso de extracción los gases caliente pierden temperatura, caudal de 2.55 m³/s, el calor específico y densidad se toma como la de aire a una temperatura promedio de 100 °C. (Ver anexo 8).

$$\dot{Q}_{int} = \dot{m}_h \cdot Cp_h \cdot (Th_{ent} - Th_{sal})$$

$$\dot{Q}_{int} = 2.411 \frac{kg}{s} \cdot 1.009 \frac{kJ}{kg \cdot ^\circ C} \cdot (150 - 50)^\circ C$$

$$\dot{Q}_{int} = 243.269 kW$$

Una vez calculada la velocidad de transferencia de calor del fluido caliente, se determina la temperatura de salida de agua fría, que se propone utilizar para calentar agua que sirve para el aseo diario del personal que trabaja en la empresa Metalmecánica Don Bosco, que se encuentra anexa a la Universidad Politécnica Salesiana.

Para esta finalidad se dispone de los siguientes datos: la temperatura de entrada del agua; 17 °C temperatura ambiente, caudal proporcionado por la red de agua potable de 2 L/s, el calor específico del agua se toma a temperatura promedio de 35 °C, (ver anexo 20).

$$\dot{Q}_{int} = \dot{m}_c \cdot Cp_c \cdot (Tc_{sal} - Tc_{ent})$$

$$Tc_{sal} = \frac{\dot{Q}_{int}}{\dot{m}_c \cdot Cp_c} + Tc_{ent}$$

$$T_{c_{sal}} = \frac{243.269 \text{ kW}}{1.992 \frac{\text{kg}}{\text{s}} \cdot 4.178 \frac{\text{kJ}}{\text{kg} \cdot ^\circ\text{C}}} + 17 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{c_{sal}} = 46.230 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$T_{c_{sal}} = 46 \text{ }^\circ\text{C}$$

La temperatura de salida de agua luego de haberse intercambiado el calor es de 46 °C que es una temperatura adecuada para el aseo personal.

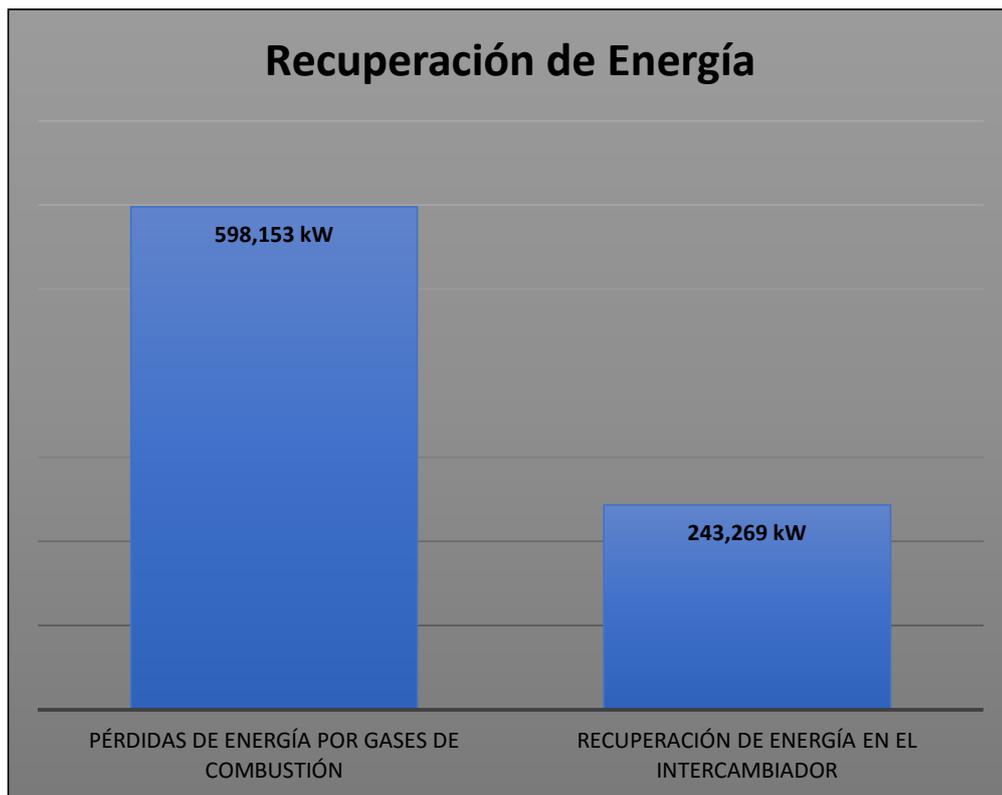


Figura 4. 6. Recuperación de energía en el intercambiador de calor.

Al determinar la velocidad de transferencia en el intercambio de calor se puede apreciar que la recuperación de energía es notable, (figura 4.6), por lo que es necesario implementar este sistema de extracción de gases calientes conjuntamente con el intercambiador de calor de flujo cruzado, debido a que no se puede continuar desperdiciando tanta energía, ya que para producir esta se consumen portadores energéticos como gas licuado de petróleo y energía eléctrica.

En la figura 4.7 se aprecia que la recuperación de energía es del 40.67 % del total de energía que el horno de fundición de aluminio desecha, por otro lado, también se aprecia la cantidad de energía desperdiciada hacia a la atmosfera después de intercambiarlo con agua.

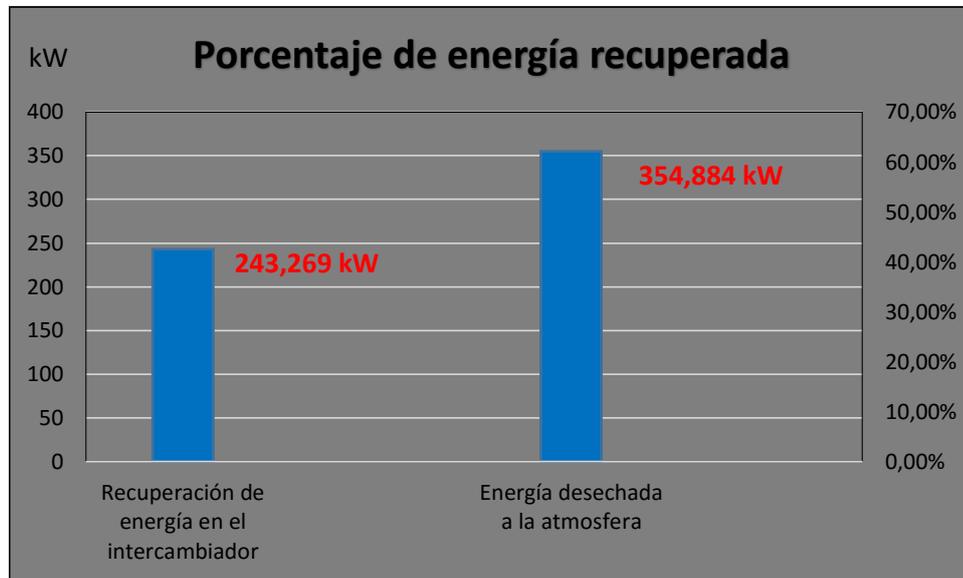


Figura 4. 7. Porcentaje de recuperación de energía por el intercambiador.

4.5. Valoración económica de la propuesta

Realizada una investigación elemental de los sistemas de extracción localizada con recuperación de energía en el sector industrial, para fundiciones; en la parte norte de la ciudad de Quito, se encontró que no existen empresas que contengan este tipo de equipos, por lo que es necesario presentar una valoración económica para la futura implementación de estos equipos.

Para ello hay que tener en cuenta algunas consideraciones en el cálculo de la valoración económica:

- ✓ El horno de fundición de aluminio opera en apenas ocho ocasiones al año.
- ✓ El tiempo de funcionamiento es de 40 minutos desde que la temperatura de los gases llega a 170 °C hasta que se apaga el horno de fundición, no se toma en cuenta precalentamiento del mismo.
- ✓ La capacidad de los tanques de reservorio de agua es de 3000 litros cada uno.

Para determinar la valoración económica de la propuesta se necesita conocer el costo inicial que es necesario para implementar el sistema.

Tabla 4. 5. Costo inicial de para la implementación de la propuesta.

Descripción	Costo
Campana y ductos de extracción	\$ 5.500,00
Obras civiles del laboratorio	\$ 4.000,00
Ventilador extractor axial	\$ 2.300,00
Bomba hidráulica	\$ 200,00
Tanque de reservorio de agua (dos)	\$ 700,00
Tubería de agua	\$ 150,00
Intercambiador de flujo cruzado	\$ 1.500,00
Costo total	\$ 14.350,00

En la empresa Metalmecánica Don Bosco existen 20 personas, que luego de su jornada laboral, toman una ducha, que les toma aproximadamente 10 minutos por persona y con el consumo de 200 litros, al utilizar cinco duchas termoeléctricas de 4000 W cada una.

Tabla 4. 6. Consumo de energía eléctrica en termo duchas.

Artefacto eléctrico	Cant	Potencia eléctrica kW	de consumo (día)	Energía kWh (día)	Costo por kWh	Valor a pagar (día)	Valor a pagar (año)
Termo ducha	5	4	0,6666	13,332	\$ 1,04	\$ 13,87	\$ 4.339,83

En la tabla 4.7 se aprecia el costo que genera utilizar las cinco termo-duchas para el aseo personal de los trabajadores de la Metalmecánica Don Bosco, si en lugar de utilizar estos artefactos eléctricos, se usa el agua caliente proveniente del intercambio de calor, este coste vendría a ser un egreso menos en el balance económico de la empresa.

4.5.1 Análisis de valor actual neto (VAN) y tasa interna de retorno (TIR)

El VAN es un indicador financiero que mide los flujos de los futuros ingresos y egresos que tendrá la propuesta, para determinar, si luego de deducir la inversión inicial, queda alguna ganancia. Si el resultado es positivo, el proyecto es viable. Otra forma de calcular lo mismo es mirar la Tasa Interna de Retorno, que sería el

tipo de interés en el que el VAN se hace cero. Si el TIR es alto, la propuesta es rentable, sin embargo, si el TIR es bajo, se debe considerar otra vía para invertir el dinero.

Tabla 4. 7. Datos para la proyección de VAN y TIR

Datos	Valores
Número de periodos	5
Tipo de periodo	anual
Tasa de descuento (i)	10%
Inversión inicial	\$ 14.350,00

Tabla 4. 8. Valores de flujo de caja y mantenimiento por año

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Valor ahorrado por uso de agua caliente	\$ 4.339,83	\$ 4.339,83	\$ 4.339,83	\$ 4.339,83	\$ 4.339,83
Mantenimiento	\$ 0,00	\$ 80,00	\$ 120,00	\$ 150,00	\$ 170,00
Flujo de caja	\$ 4.339,83	\$ 4.259,83	\$ 4.219,83	\$ 4.189,83	\$ 4.169,83

En la tabla 4.8 se aprecian los valores para determinar el valor actual neto de la propuesta, y en la tabla 4.9 el valor de los flujos de caja, que es, el costo ahorrado menos el costo que tendrá el mantenimiento del equipo. Esto si el horno de fundición llegase a operar de lunes a sábado.



Figura 4. 8. Tasa interna de retorno.

En la figura 4.8 se visualiza el valor actual neto y la tasa de retorno para la operación continua del horno de fundición de aluminio, llegando a ser este proyecto viable para su implementación.

Como ya se dijo en páginas anteriores el horno de fundición de aluminio solamente opera en ocho ocasiones anuales, con este sistema de operación, la propuesta del mejoramiento de los parámetros operacionales no es viable como se visualiza en la figura 4.9.

Tabla 4. 9. Valores de flujo de caja y mantenimiento para la operación esporádica

Descripción	Año 1	Año 2	Año 3	Año 4	Año 5
Valor ahorrado por uso de agua caliente	\$ 110,96	\$ 110,96	\$ 110,96	\$ 110,96	\$ 110,96
Mantenimiento	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00	\$ 0,00
Flujo de caja	\$ 110,96				

El valor de \$110,96 anual es el que se ahorra si la propuesta llegase a ser construida por la Universidad Politécnica Salesiana.

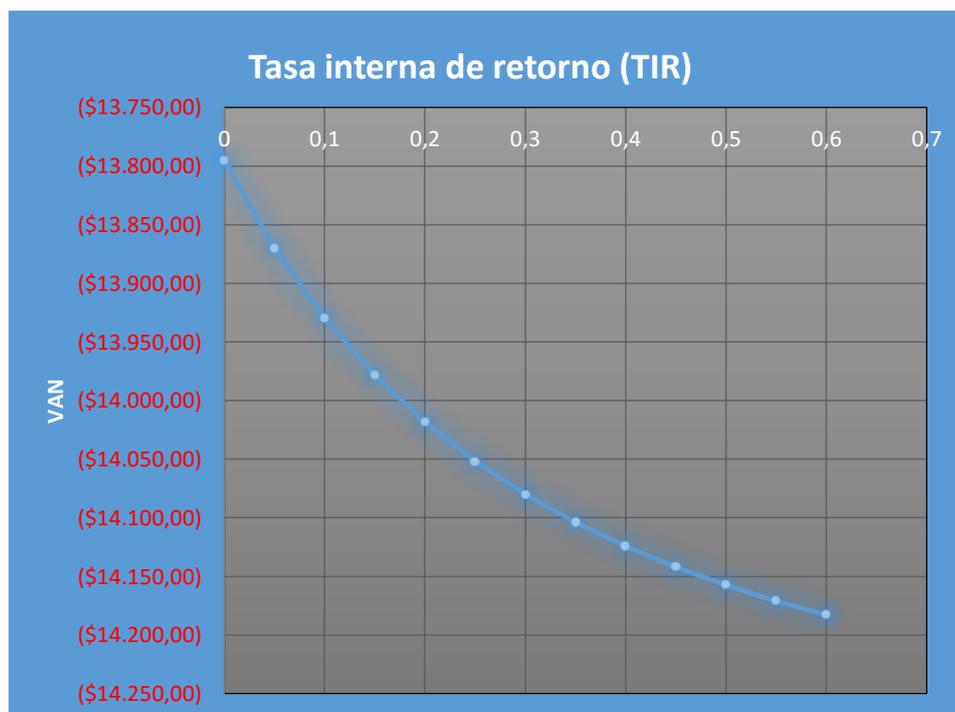


Figura 4. 9. Tasa interna de retorno para una operación esporádica.

4.6. Eficiencia térmica del proceso de fundición

La eficiencia térmica del proceso de fundición mediante el horno de fundición tipo crisol, la campana de extracción de gases calientes y el intercambiador de calor de flujo cruzado, incrementan la eficiencia de toso este proceso ya que, en el momento actual se tiene solamente la eficiencia del horno por sí solo, sin embargo con la propuesta de implementación de la mejora de estos parámetros operacionales la eficiencia del proceso asciende considerablemente, debido a que, la energía que antes solo se utilizaba para la fundición del metal, ahora también sirve para otro proceso que no está relacionado con el de fundición, sino que es de gran beneficio de manera económica y ambiental.

4.7. Conclusiones del capítulo

- ✓ Mediante la ampliación del laboratorio de fundición de la Universidad Politécnica Salesiana se mejora la operación del mismo ya que existe un área de 100 m² para maniobrar y con eso se evitan incidentes dentro del laboratorio.
- ✓ Con sistema de extracción de gases calientes se contribuye a mejorar la calidad de aire al interior del laboratorio de fundición y se evitan futuros problemas de salud a estudiantes, docentes y operarios del equipo.
- ✓ Con el diseño del intercambiador calor de flujo cruzado se está aprovechando el 40 % de la energía que el horno desecha al medio ambiente.

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se modelo y simulo mediante ANSYS para la verificación de los efectos que se producen en la temperatura del horno de fundición debido a las tres capas protectoras, siendo la capa de lana de vidrio la que mantiene la mayor cantidad de calor.
2. Se determinó la eficiencia térmica actual del horno de fundición de aluminio tipo crisol de la Universidad Politécnica Salesiana, la que fue de 6.44 %, y a pesar de ser baja esta entre los límites para este tipo de horno.
3. Se comprobó que mediante la variación de los parámetros operacionales, el diseño de una campana de extracción de los gases provenientes del proceso de combustión y el posterior intercambio de calor, se recupera el 45 % de la energía desechada a la atmosfera.
4. La valoración económica para la implementación de las mejoras operacionales, el sistema de extracción de gases calientes y el intercambio de calor es viable solo sí, el horno de fundición llegase a funcionar todos los días, sin embargo del horno funciona ocho veces al año, por este motivo no es factible esta propuesta, a pesar de esto la propuesta ayuda a mejorar la calidad el buen vivir en un laboratorio educativo como es el de fundición.

RECOMENDACIONES

1. Profundizar el estudio en la determinación de la eficiencia térmica de otro tipo de horno de fundición como:
 - ✓ Horno de inducción.
 - ✓ Horno de cubilote.
 - ✓ Horno eléctrico.
2. Realizar el análisis, modelación y simulación para hornos de fundición con características distintas a este, en donde se puedan evaluar diversas características técnicas.
3. Fomentar el buen uso de la energía térmica en los procesos de fundición ya que con el uso de esta energía se genera ahorro económico.
4. Estudiar el cambio del quemador actual del horno hacia uno eléctrico, ya que con la nueva matriz energética, la electricidad será más económica y menos contaminante que el gas licuado de petróleo.
5. Analizar la eficiencia térmica del horno de fundición para otro tipo de material como el cobre o bronce, ya que con estos materiales se puede fundir mayor cantidad de estos.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Bibliografía citada

- ACGIH. (2007). *Ventilation Industrial* (28 ed.). Cincinnati.
- Agencia de Regulación y Control Hidrocarburífero. (2014). *COMERCIALIZACIÓN DE GAS LICUADO DE PETRÓLEO EN EL ECUADOR*.
- Arias, F. (2006). *Introducción a la metodología científica*. Caracas-Venezuela: Episteme.
- Aristizábal, E. (2006). Simulación del proceso de fusión y obtención de los diagramas de red para el horno de cubilote de la Universidad de Antioquia. *Facultad de Ingeniería*, 177.
- Arrieta-Cadavid. (2013). Horno de crisol autoregenerativo para procesos de alta temperatura. *FUNDIDORES*, 17.
- Asamblea Constituyente. (2008). *Constitución de la República del Ecuador*. Montecristí.
- ASHRAE. (2002). *Guide and Data Book, Applications*.
- Balseriro-Quintero. (2012). *Diseño y construcción de un horno para sinterización de materiales metálicos aleados mecánicamente*. Bucaramanga.
- Cabañas, T. (Octubre de 2013). Pasado, presente y futuro de las técnicas de fundición. *FUNDIDORES*, 200, 17-20.
- Canales-Alvarado-Pineda. (1994). *Metodología de la investigación*. Washington D.C.
- Castejon, E. (2010). Extracción localizada.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Nevada: McGraw-Hill.
- Cengel-Boles. (2008). *Termodinámica*. Nevada: McGraw Hill.

- Chiquito, L. (2006). *Diseño de un sistema de extracción de humos y polvos secundarios para el proceso de producción de acero mediante horno de arco eléctrico*. Guayaquil.
- Corporación Financiera Internacional. (2007). *Guías sobre medio ambiente, salud y seguridad para fundiciones*.
- Cortes-Iglesias. (2004). *Generalidades sobre la investigación científica*. Campeche-Mexico.
- Danna, C.-G. (24 de Agosto de 2014). *PROCESOS DE MANUFACTURA*. Obtenido de <http://loquedicecartagena.blogspot.com/>
- Departamento de Ingeniería Industrial. (05 de 10 de 2012). *Facultad regional de Buenos Aires*. Obtenido de http://industrial.frba.utn.edu.ar/MATERIAS/seguridad/archivos/u7_ventilacion.pdf
- Empresa Eléctrica Quito. (Mayo de 2015). *Pliego tarifario de la empresa electrica Quito*. Obtenido de <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/143788/PLIEGO+TARIFARIO+MAYO+2015/1d21c6f3-a1c8-4cad-8610-25dd3b4cfc9e>
- Faires-Simmang. (1983). *Termodinámica*. Mexico: UTEHA.
- Fein, P. (2013). Recuperadoras térmicas de arena para todas la fundiciones. *FUNDIDORES*, 17.
- Flores-Orellana. (2014). *Diseño y construcción de un horno de crisol para aleaciones no ferrosas*. San Salvador.
- Fundidores. (2013). Reducción a casi la mitad de los costes energéticos. *FUNDIDORES*, 26.
- Hernandez, I. (08 de 2010). *termoaplicadaunefm*. Obtenido de <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2012/01/clase-de-intercambiadores.pdf>
- Holman, P. (1999). *Transferencia de calor*. Madrid: McGRAW-HILL.

- Incropera-DeWitt. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico: Pearson.
- INEN 440, I. E. (2004). *COLORES DE IDENTIFICACION DE TUBERIAS*. Obtenido de <http://www.prosigma.com.ec/pdf/gso/INEN440Colores-de-Identificacion-de-Tuberias.pdf>
- Jost, M. (26 de Abril de 2011). *Minnesota Technical Assistant Program*. Obtenido de <http://www.mntap.umn.edu/metalcast/energy.htm>
- Junchaya, S. (Noviembre de 2010). <http://industrial.unmsm.edu.pe/>. Obtenido de <http://industrial.unmsm.edu.pe/>
- Koshkin-Shirkévich. (1975). *Manual de Física elemental*.
- López, J. Á. (2013). *Verificación de sistemas de ventilación por extracción localizada*.
- Malpohl-Hillen. (2010). Hornos fundidores de aluminio para la fundición a presión. *FUNDIDORES*, 17.
- MMAMRM, M. D. (2009). *MTDs para forja y fundición*. Bilbao.
- Mojica, F. (2005). *Modelación matemática del comportamiento térmico de un horno de cocción tipo abierto*. Caracas.
- Nabertherm. (2010). *Gas heated Crucible Furnance system*. Alemania.
- Ortega, A. (2008). *Diseño del sistema de extraccion de gases para un asador de pollos*. Quito.
- Ortiz-Ruiz. (2013). *MODELADO DE PROCESOS DE MANUFACTURA*. Mexico.
- Palau - Soler. (2010). *Catálogo S&P 2011*.
- Pulido, A. (30 de Marzo de 2009). *APRENDEMOS TECNOLOGÍA*. Obtenido de <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2009/03/tecnicas-de-moldeo.pdf>
- Rivera-García, P. (2013). *Marco Teórico, Elemento Fundamental en el proceso de la Investigación Científica*. Mexico.

SENER. (2010). *LISTA DE COMBUSTIBLES*. Mexico.

Soler & Palau. (2012). *Manual práctico de ventilación*.

Toro, A. (2009). *Diseño y cálculo del sistema de ventilación de la cámara de máquinas de un buque*. Cadiz.

Wikispaces. (24 de Junio de 2015). *Conformación por Moldeo I*. Obtenido de Wikispaces:
<https://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/14+Moldeo1.pdf>

Bibliografía consultada

ACGIH. (2007). *Ventilation Industrial* (28 ed.). Cincinnati.

Arias, F. (2006). *Introducción a la metodología científica*. Caracas-Venezuela: Episteme.

Arrieta-Cadavid. (2013). Horno de crisol autoregenerativo para procesos de alta temperatura. *FUNDIDORES*, 17.

ASHRAE. (2002). *Guide and Data Book, Applications*.

Canales-Alvarado-Pineda. (1994). *Metodología de la investigación*. Washington D.C.

Castejon, E. (2010). Extracción localizada.

Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Nevada: McGraw-Hill.

Cengel-Boles. (2008). *Termodinámica*. Nevada: McGraw Hill.

Cortes-Iglesias. (2004). *Generalidades sobre la investigación científica*. Campeche-Mexico.

Faires-Simmang. (1983). *Termodinámica*. Mexico: UTEHA.

Fein, P. (2013). Recuperadoras térmicas de afreña para todas las fundiciones. *FUNDIDORES*, 17.

Fundidores. (2013). Reducción a casi la mitad de los costes energéticos. *FUNDIDORES*, 26.

Holman, P. (1999). *Transferencia de calor*. Madrid: McGRAW-HILL.

Incropera-DeWitt. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor*. Mexico: Pearson.

López, J. Á. (2013). *Verificación de sistemas de ventilación por extracción localizada*.

Malpohl-Hillen. (2010). Hornos fundidores de aluminio para la fundición a presión. *FUNDIDORES*, 17.

Nabertherm. (2010). *Gas heated Crucible Furnance system*. Alemania.

Palau - Soler. (2010). *Catálogo S&P 2011*.

Rivera-García, P. (2013). *Marco Teórico, Elemento Fundamental en el proceso de la Investigación Científica*. Mexico.

Soler & Palau. (2012). *Manual práctico de ventilación*.

Bibliografía WEB

Danna, C.-G. (24 de Agosto de 2014). *PROCESOS DE MANUFACTURA*.
Obtenido de <http://loquedicecartagena.blogspot.com/>

Departamento de Ingeniería Industrial. (05 de 10 de 2012). *Facultad regional de Buenos Aires*. Obtenido de http://industrial.frba.utn.edu.ar/MATERIAS/seguridad/archivos/u7_ventilacion.pdf

Empresa Eléctrica Quito. (Mayo de 2015). *Pliego tarifario de la empresa electrica Quito*. Obtenido de <http://www.eeq.com.ec:8080/documents/10180/143788/PLIEGO+TARIFARIO+MAYO+2015/1d21c6f3-a1c8-4cad-8610-25dd3b4cfc9e>

- Hernandez, I. (08 de 2010). *termoaplicadaunefm*. Obtenido de <https://termoaplicadaunefm.files.wordpress.com/2012/01/clase-de-intercambiadores.pdf>
- INEN 440, I. E. (2004). *COLORES DE IDENTIFICACION DE TUBERIAS*. Obtenido de <http://www.prosigma.com.ec/pdf/gssso/INEN440Colores-de-Identificacion-de-Tuberias.pdf>
- Jost, M. (26 de Abril de 2011). *Minnesota Technical Assistant Program*. Obtenido de <http://www.mntap.umn.edu/metalcast/energy.htm>
- Junchaya, S. (Noviembre de 2010). <http://industrial.unmsm.edu.pe/>. Obtenido de <http://industrial.unmsm.edu.pe/>
- Pulido, A. (30 de Marzo de 2009). *APRENDEMOS TECNOLOGÍA*. Obtenido de <https://iesvillalbahervastecnologia.files.wordpress.com/2009/03/tecnicas-de-moldeo.pdf>
- Wikispaces. (24 de Junio de 2015). *Conformación por Moldeo I*. Obtenido de Wikispaces:
<https://tecnologiafuentenueva.wikispaces.com/file/view/14+Moldeo1.pdf>

ANEXOS

Anexo 1. Operacionalización de las variables

Anexo 1.a Operacionalización de la variable independiente.

Variable independiente					
Concepto	Categoría	Indicador	Ítem	Técnicas	Instrumentos
El horno de fundición de aluminio es el equipo que, logra a partir de la adición de calor que el metal cambie de fase sólida a líquida por lo que el funcionamiento técnico debe ser el adecuado.	Temperatura	Temperatura en el interior del horno de fundición	°C	Medición	Termocupla Termómetro
	Bloques de aluminio	Cantidad de aluminio a fundir.	kg	Medición	Balanza.
	Horno de fundición	Localización del horno de fundición	m ²	Medición	Flexómetro
	Extracción de gases calientes	Campana de extracción de gases calientes	m ³ /s	Medición	Cálculos
	Temperatura	Temperatura en el exterior del horno	°C	Medición	Termocupla Termómetro

Anexo 1.b Operacionalización de la variable dependiente.

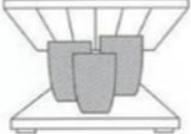
Variable dependiente					
Concepto	Categoría	Indicador	Ítem	Técnicas	Instrumentos
La eficiencia térmica del horno de fundición de aluminio depende de algunas circunstancias como: el diseño, utilización, combustión, proceso, mantenimiento y pérdidas de calor.	Salida de gases de combustión	Flujo volumétrico	m ³	Medición	Cálculos
	Gas licuado de petróleo	Consumo de gas licuado de petróleo	kg/h	Medición	Manómetro Cálculos
	Mantenimiento	Periodo para realizar los mantenimientos	Hora	Medición	Cuestionario Entrevista
	Calor generado	Pérdidas por transferencia de calor.	kJ	Cálculos	Ecuaciones
	Energía eléctrica	Consumo de electricidad	kW/h	Medición	Vatímetro

Anexo 2. Poder calorífico de combustibles.

Combustible	Unidades de medida	Poder calorífico
Asfaltos	(MJ/bl)	6,444
Azufre	(MJ/t)	9,269
Bagazo de caña	(MJ/t)	7,055
Carbón siderúrgico de importación	(MJ/t)	29,559
Carbón siderúrgico nacional	(MJ/t)	19,987
Carbón térmico de importación	(MJ/t)	25,284
Carbón térmico nacional	(MJ/t)	19,405
Combustóleo	(MJ/bl)	6,429
Condensados	(MJ/bl)	4,845
Coque de carbón	(MJ/t)	26,521
Coque de petróleo	(MJ/t)	31,424
Diesel	(MJ/bl)	5,952
Equivalente de electricidad en términos secundarios	(MJ/MWh)	3,600
Equivalente primario de energía eléctrica	(MJ/MWh)	10,381
Etano	(MJ/bl)	2,854
Gas licuado	(MJ/bl)	4,251
Gas natural asociado ¹	(kJ/m ³)	40,053
Gas natural no asociado ²	(kJ/m ³)	37,296
Gas seco ³	(kJ/m ³)	33,913
Gas seco de exportación	(kJ/m ³)	35,812
Gas seco de importación	(kJ/m ³)	34,614
Gasolinas naturales	(MJ/bl)	4,781

Fuente: (SENER, 2010)

Anexo 3. Recomendaciones y transporte del crisol.

MANEJO GENERAL	
<p>Inspeccionar el empaque y los crisoles antes de usarlos para verificar que no se hayan dañado durante el transporte.</p>	
<p>Nunca rodar los crisoles en el piso, utilizar herramientas apropiadas para evitar que se talle el crisol. Cualquier daño en la superficie del vitrificado de protección acelera la oxidación, provocando pérdida de la resistencia mecánica y falla prematura.</p>	
<p>Los crisoles siempre deben almacenarse en un lugar seco, cálido y bien ventilado.</p>	
<p>Los crisoles no deben almacenarse directamente sobre el concreto, pavimento o tierra. Siempre deben estar sobre una base plana. Los crisoles son higroscópicos y pueden absorber humedad de la atmosfera, así como de un piso húmedo.</p>	
<p>Si el refractario húmedo es calentado o puesto en contacto con metal fundido, se pueden generar grietas y/o una explosión o reacción violenta como las mostradas.</p>	

Anexo 4. Propiedades de metales sólidos.

Propiedades de metales sólidos

Composición	Punto de fusión, K	Propiedades a 300 K				Propiedades a varias temperaturas (K), $k(\text{W/m} \cdot \text{K})/c_p(\text{J/kg} \cdot \text{K})$					
		ρ kg/m ³	C_p J/kg · K	k W/m · K	$\alpha \times 10^6$ m ² /s	100	200	400	600	800	1 000
Aluminio:											
Puro	933	2 702	903	237	97.1	302	237	240	231	218	
						482	798	949	1 033	1 146	
Aleación 2024-T6 (4.5% Cu, 1.5% Mg, 0.6% Mn)	775	2 770	875	177	73.0	65	163	186	186		
						473	787	925	1 042		
Aleación 195, fundido (4.5% Cu)		2 790	883	168	68.2			174	185		
Berilio	1 550	1 850	1 825	200	59.2	990	301	161	126	106	90.8
						203	1 114	2 191	2 604	2 823	3 018
Bismuto	545	9 780	122	7.86	6.59	16.5	9.69	7.04			
						112	120	127			
Boro	2 573	2 500	1 107	27.0	9.76	190	55.5	16.8	10.6	9.60	9.85
						128	600	1 463	1 892	2 160	2 338
Cadmio	594	8 650	231	96.8	48.4	203	99.3	94.7			
						198	222	242			
Cromo	2 118	7 160	449	93.7	29.1	159	111	90.9	80.7	71.3	65.4
						192	384	484	542	581	616
Cobalto	1 769	8 862	421	99.2	26.6	167	122	85.4	67.4	58.2	52.1
						236	379	450	503	550	628
Cobre:											
Puro	1 358	8 933	385	401	117	482	413	393	379	366	352
						252	356	397	417	433	451
Bronce comercial (90% Cu, 10% Al)	1 293	8 800	420	52	14		42	52	59		
							785	160	545		
Bronce al fósforo para engranes (89% Cu, 11% Sn)	1 104	8 780	355	54	17		41	65	74		
							—	—	—		

Fuente: (Incropera-DeWitt, 1999)

Anexo 5. Propiedades de metales, calor latente de fusión y vaporización

Sustancia	T fusión °C	$L_f \cdot 10^3$ (J/kg)	T ebullición °C	$L_v \cdot 10^3$ (J/kg)
Hielo (agua)	0	334	100	2260
Alcohol etílico	-114	105	78.3	846
Acetona	-94.3	96	56.2	524
Benceno	5.5	127	80.2	396
Aluminio	658.7	322-394	2300	9220
Estaño	231.9	59	2270	3020
Hierro	1530	293	3050	6300
Cobre	1083	214	2360	5410
Mercurio	-38.9	11.73	356.7	285
Plomo	327.3	22.5	1750	880
Potasio	64	60.8	760	2080
Sodio	98	113	883	4220

Fuente: (Koshkin-Shirkévich, 1975)

l_f : calor latente de fusión.

L_v : Calor latente de vaporización.

Anexo 6. Propiedades de diversos materiales

Material	Densidad, ρ kg/m ³	Conductividad térmica, k , W/m · K	Calor espe- cífico, c_p J/kg · K	Material	Densidad, ρ kg/m ³	Conductividad térmica, k , W/m · K	Calor espe- cífico, c_p J/kg · K
Asfalto	2 115	0.062	920	Hielo			
Baquelita	1 300	1.4	1 465	273 K	920	1.88	2 040
Ladrillo refractario				253 K	922	2.03	1 945
Ladrillo de cromita				173 K	928	3.49	1 460
473 K	3 010	2.3	835	Cuero para suela	998	0.159	—
823 K	—	2.5	—	Linóleo	535	0.081	—
1173 K	—	2.0	—		1 180	0.186	—
Arcilla refractaria				Mica	2 900	0.523	—
cocida				Papel	930	0.180	1 340
1600 K				Plásticos			
773 K	2 050	1.0	960	Plexiglas	1 190	0.19	1 465
1073 K	—	1.1	—	Teflón			
1373 K	—	1.1	—	300 K	2 200	0.35	1 050
Arcilla refractaria				400 K	—	0.45	—
cocida				Lexan	1 200	0.19	1 260
1725 K				Nylon	1 145	0.29	—
773 K	2 325	1.3	960	Polipropileno	910	0.12	1 925
1073 K	—	1.4	—	Poliéster	1 395	0.15	1 170
1373 K	—	1.4	—	PVC, vinilo	1 470	0.1	840
Ladrillo de arcilla				Porcelana	2 300	1.5	—
refractaria				Caucho natural	1 150	0.28	—
478 K	2 645	1.0	960	Caucho vulcanizado			
922 K	—	1.5	—	Blando	1 100	0.13	2 010
1478 K	—	1.8	—	Duro	1 190	0.16	—
Magnesita				Arena	1 515	0.2-1.0	800
478 K	—	3.8	1 130	Nieve reciente	100	0.60	—
922 K	—	2.8	—	Nieve, 273 K	500	2.2	—
1478 K	—	1.9	—	Suelo seco	1 500	1.0	1 900

Fuente: (Incropera-DeWitt, 1999)

Anexo 7. Materiales y sistemas de aislamiento

Descripción/composición	Propiedades típicas a 300 K		
	Densidad, ρ (kg/m ³)	Conductividad térmica, k (W/m · K)	Calor específico, c_p (J/kg · K)
Manta y fibra			
Fibra de vidrio, revestida de papel	16	0.046	—
	28	0.038	—
	40	0.035	—
Fibra de vidrio, recubierta; forro de tubo	32	0.038	835
Tablero y losa			
Modular	145	0.058	1000
Vidrio, unión orgánica	105	0.036	795
Poliestireno, expandido			
Estirado (R-12)	55	0.027	1210
Lechos moldeados	16	0.040	1210
Lámina de fibra mineral; material de techado	265	0.049	—
Madera, triturada/encementada	350	0.087	1590

Fuente: (Holman, 1999)

Anexo 8. Propiedades del aire

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

Fuente: (Cengel, 2007)

Anexo 9. Emisividades de las superficies

TABLA A-18

Emisividades de las superficies

a) Metales

Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ	Material	Temperatura, K	Emisividad, ϵ
Aluminio			Magnesio pulido	300-500	0.07-0.13
Pulido	300-900	0.04-0.06	Mercurio	300-400	0.09-0.12
Lámina comercial	400	0.09	Molibdeno		
Intensamente oxidado	400-800	0.20-0.33	Pulido	300-2 000	0.05-0.21
Anodizado	300	0.8	Oxidado	600-800	0.80-0.82
Bismuto brillante	350	0.34	Níquel		
Latón			Pulido	500-1 200	0.07-0.17
Intensamente pulido	500-650	0.03-0.04	Oxidado	450-1 000	0.37-0.57
Pulido	350	0.09	Platino pulido	500-1 500	0.06-0.18
Placa mate	300-600	0.22	Plata pulida	300-1 000	0.02-0.07
Oxidado	450-800	0.6	Acero inoxidable		
Cromo pulido	300-1 400	0.08-0.40	Pulido	300-1 000	0.17-0.30
Cobre			Ligeramente oxidado	600-1 000	0.30-0.40
Intensamente pulido	300	0.02	Intensamente oxidado	600-1 000	0.70-0.80
Pulido	300-500	0.04-0.05	Acero		
Lámina comercial	300	0.15	Lámina pulida	300-500	0.08-0.14
Oxidado	600-1 000	0.5-0.8	Lámina comercial	500-1 200	0.20-0.32
Oxidado en negro	300	0.78	Intensamente oxidado	300	0.81
Oro			Estaño pulido	300	0.05
Intensamente pulido	300-1 000	0.03-0.06	Tungsteno		
Hoja brillante	300	0.07	Pulido	300-2 500	0.03-0.29
Hierro			Filamento	3500	0.39
Intensamente pulido	300-500	0.05-0.07	Zinc		
Hierro fundido	300	0.44	Pulido	300-800	0.02-0.05
Hierro forjado	300-500	0.28	Oxidado	300	0.25
Aherrumbrado	300	0.61			
Oxidado	500-900	0.64-0.78			
Plomo					
Pulido	300-500	0.06-0.08			
No oxidado, áspero	300	0.43			
Oxidado	300	0.63			

Fuente: (Cengel, 2007)

Anexo 10. Propiedades de combustibles e hidrocarburos comunes

Propiedades de algunos combustibles e hidrocarburos comunes

Combustible (fase)	Fórmula	Masa molar, kg/kmol	Densidad, ¹ kg/L	Entalpía de vaporización, ² kJ/kg	Calor específico, ¹ c_p , kJ/kg · K	Poder calorífico superior, ³ kJ/kg	Poder calorífico inferior, ³ kJ/kg
Acetileno (g)	C ₂ H ₂	26.038	—	—	1.69	49,970	48,280
Benceno (ℓ)	C ₆ H ₆	78.114	0.877	433	1.72	41,800	40,100
Butano (ℓ)	C ₄ H ₁₀	58.123	0.579	362	2.42	49,150	45,370
Carbono (s)	C	12.011	2	—	0.708	32,800	32,800
Decano (ℓ)	C ₁₀ H ₂₂	142.285	0.730	361	2.21	47,640	44,240
Diesel ligero (ℓ)	C _n H _{1.8n}	170	0.78–0.84	270	2.2	46,100	43,200
Diesel pesado (ℓ)	C _n H _{1.7n}	200	0.82–0.88	230	1.9	45,500	42,800
Etano (g)	C ₂ H ₆	30.070	—	172	1.75	51,900	47,520
Etanol (ℓ)	C ₂ H ₆ O	46.069	0.790	919	2.44	29,670	26,810
Gas natural (g)	C _n H _{3.8n} N _{0.1n}	18	—	—	2	50,000	45,000
Gasolina (ℓ)	C _n H _{1.87n}	100–110	0.72–0.78	350	2.4	47,300	44,000
Heptano (ℓ)	C ₇ H ₁₆	100.204	0.684	365	2.24	48,100	44,600
Hexano (ℓ)	C ₆ H ₁₂	84.161	0.673	392	1.84	47,500	44,400
Hexeno (ℓ)	C ₆ H ₁₄	86.177	0.660	366	2.27	48,310	44,740
Hidrógeno (g)	H ₂	2.016	—	—	14.4	141,800	120,000
Isopentano (ℓ)	C ₅ H ₁₂	72.150	0.626	—	2.32	48,570	44,910
Metano (g)	CH ₄	16.043	—	509	2.20	55,530	50,050
Metanol (ℓ)	CH ₄ O	32.042	0.790	1168	2.53	22,660	19,920
Monóx. de carbono (g)	CO	28.013	—	—	1.05	10,100	10,100
Octano (ℓ)	C ₈ H ₁₈	114.231	0.703	363	2.23	47,890	44,430
1-Penteno (ℓ)	C ₅ H ₁₀	70.134	0.641	363	2.20	47,760	44,630
Propano (ℓ)	C ₃ H ₈	44.097	0.500	335	2.77	50,330	46,340
Tolueno (ℓ)	C ₇ H ₈	92.141	0.867	412	1.71	42,400	40,500

Fuente: (Cengel, 2007)

Anexo 11. Tabla de entalpía de formación.

Entalpía de formación, función de Gibbs de formación y entropía absoluta a 25°C, 1 atm

Sustancia	Fórmula	\bar{h}_f° kJ/kmol	\bar{g}_f° kJ/kmol	\bar{s}° kJ/kmol · K
Acetileno	$C_2H_2(g)$	+226,730	+209,170	200.85
Agua	$H_2O(l)$	-285,830	-237,180	69.92
Alcohol etílico	$C_2H_5OH(g)$	-235,310	-168,570	282.59
Alcohol etílico	$C_2H_5OH(l)$	-277,690	-174,890	160.70
Alcohol metílico	$CH_3OH(g)$	-200,670	-162,000	239.70
Alcohol metílico	$CH_3OH(l)$	-238,660	-166,360	126.80
Amoniaco	$NH_3(g)$	-46,190	-16,590	192.33
Benceno	$C_6H_6(g)$	+82,930	+129,660	269.20
<i>n</i> -butano	$C_4H_{10}(g)$	-126,150	-15,710	310.12
Carbón	$C(s)$	0	0	5.74
Dióxido de carbono	$CO_2(g)$	-393,520	-394,360	213.80
<i>n</i> -dodecano	$C_{12}H_{26}(g)$	-291,010	+50,150	622.83
Etano	$C_2H_6(g)$	-84,680	-32,890	229.49
Etileno	$C_2H_4(g)$	+52,280	+68,120	219.83
Hidrógeno	$H_2(g)$	0	0	130.68
Hidrógeno	$H(g)$	+218,000	+203,290	114.72
Hidroxilo	$OH(g)$	+39,460	+34,280	183.70
Metano	$CH_4(g)$	-74,850	-50,790	186.16
Monóxido de carbono	$CO(g)$	-110,530	-137,150	197.65
Nitrógeno	$N_2(g)$	0	0	191.61
Nitrógeno	$N(g)$	+472,650	+455,510	153.30
<i>n</i> -octano	$C_8H_{18}(g)$	-208,450	+16,530	466.73
<i>n</i> -octano	$C_8H_{18}(l)$	-249,950	+6,610	360.79
Oxígeno	$O_2(g)$	0	0	205.04
Oxígeno	$O(g)$	+249,190	+231,770	161.06
Peróxido de hidrógeno	$H_2O_2(g)$	-136,310	-105,600	232.63
Propano	$C_3H_8(g)$	-103,850	-23,490	269.91
Propileno	$C_3H_6(g)$	+20,410	+62,720	266.94
Vapor de agua	$H_2O(g)$	-241,820	-228,590	188.83

Fuente: (Cengel, 2007)

Anexo 12. Tarifas de consumo de electricidad.

EMPRESA ELECTRICA QUITO
PLIEGO TARIFARIO VIGENTE
PERIODO DE CONSUMO: 1-31 DE MAYO 2015

CATEGORÍA	RANGO DE CONSUMO (kWh)	DEMANDA (US\$/kW)	CARGOS TARIFARIOS (US\$)	DESCRIPCIÓN	COMERCIALIZACIÓN (US\$/Consumidor)
A. TARIFAS BAJA Y MEDIA TENSION					
A.1	RESIDENCIAL		Se aplica a los consumidores sujetos a la categoría de Tarifa Residencial, independiente de la carga conectada.		
	0 - 50		0,0784	Por cada kWh de consumo en el mes	1,414
	51 - 100		0,0814	Por cada uno de los siguientes 50 kWh de consumo	
	101 - 150		0,0834	Por cada uno de los siguientes 50 kWh de consumo	
	151 - 200		0,0904	Por cada uno de los siguientes 50 kWh de consumo	
	201 - 250		0,0974	Por cada uno de los siguientes 50 kWh de consumo	
	251 - 500		0,0994	Por cada uno de los siguientes 250 kWh de consumo	
	501 - 700		0,1285	Por cada uno de los siguientes 200 kWh de consumo	
	701 - 1000		0,1450	Por cada uno de los siguientes 300 kWh de consumo	
	1001 - 1500		0,1709	Por cada uno de los siguientes 500 kWh de consumo	
	1501 - 2500		0,2752	Por cada uno de los siguientes 1000 kWh de consumo	
	2501 - 3500		0,4360	Por cada uno de los siguientes 1000 kWh de consumo	
	3501 y superiores		0,6812	Por cada uno de los siguientes kWh de consumo en el mes	
	Subsidio cruzado		US\$ 1.54	De descuento en el valor de la planilla por consumo a los abonados que consumen entre 1 y 130 kWh/mes, con un mínimo de pago correspondiente al cargo de energía eléctrica.	
	Subsidio Solidario		10%	Del valor de la planilla por consumo, por concepto de contribución al Subsidio Cruzado, a los abonados que consumen desde 161 kWh en adelante.	
	Subsidio Tarifa Dignidad		0,04	Los abonados Residenciales que consumen de 1 hasta 110 kWh/mes, con base al Decreto Ejecutivo N° 451-A de 1 de Julio de 2007 y Circular Nro. ARCONEL-DE-2015-002-OFI de 24 de marzo de 2015, recibirán un subsidio en un valor tal que como máximo pagarán 0,04 US\$ /kWh de consumo y 0,70 US\$ por comercialización. El valor del subsidio por la Tarifa de la Dignidad constará en la planilla que corresponda, como un concepto independiente. Para la aplicación, en los procedimientos de cálculo se considerará inicialmente la tarifa de energía eléctrica.	0,70
A.2	RESIDENCIAL PARA EL PROGRAMA PAGO POR CONSUMO		Se aplica a los consumidores sujetos a la Categoría Residencial, que se registren en el Programa PEC. Se aplicará en función del incremento del consumo de energía eléctrica mensual de cada abonado, que se determine en el programa.		
	Aplicación de acuerdo al Numeral 16 del Anexo al Pliego				1,414

CATEGORÍA	RANGO DE CONSUMO (kWh)	DEMANDA (US\$/kW)	CARGOS TARIFARIOS (US\$)	DESCRIPCIÓN	COMERCIALIZACIÓN (US\$/Consumidor)
A.3	RESIDENCIAL TEMPORAL		Se aplica a los consumidores residenciales que no tienen su residencia permanente en el área de servicio y que utilizan la energía eléctrica en forma puntual para usos domésticos (fines de semana, periodos de vacaciones, etc.).		
			0,1285	Por cada kWh de consumo al mes.	1,414
B. TARIFA GENERAL					
B.1	TARIFA GENERAL BAJA TENSION SIN DEMANDA		Esta tarifa se aplicará a los consumidores cuya potencia contratada sea de hasta 10 kW.		
B.1.1 COMERCIAL SIN DEMANDA					
	0-300		0,081	Por cada kWh de consumo de hasta 300 kWh en el mes.	1,414
	301-Superior		0,104	Por cada uno de los siguientes kWh de consumo en el mes.	
B.1.2 ENTIDADES OFICIALES SIN DEMANDA, ESCENARIOS DEPORTIVOS, SERVICIO COMUNITARIO SIN DEMANDA					
	0-300		0,071	Por cada kWh de consumo de hasta 300 kWh en el mes.	1,414
	301- superior		0,094	Por cada uno de los siguiente kWh de consumo en el mes.	

Fuente: (Empresa Eléctrica Quito, 2015)

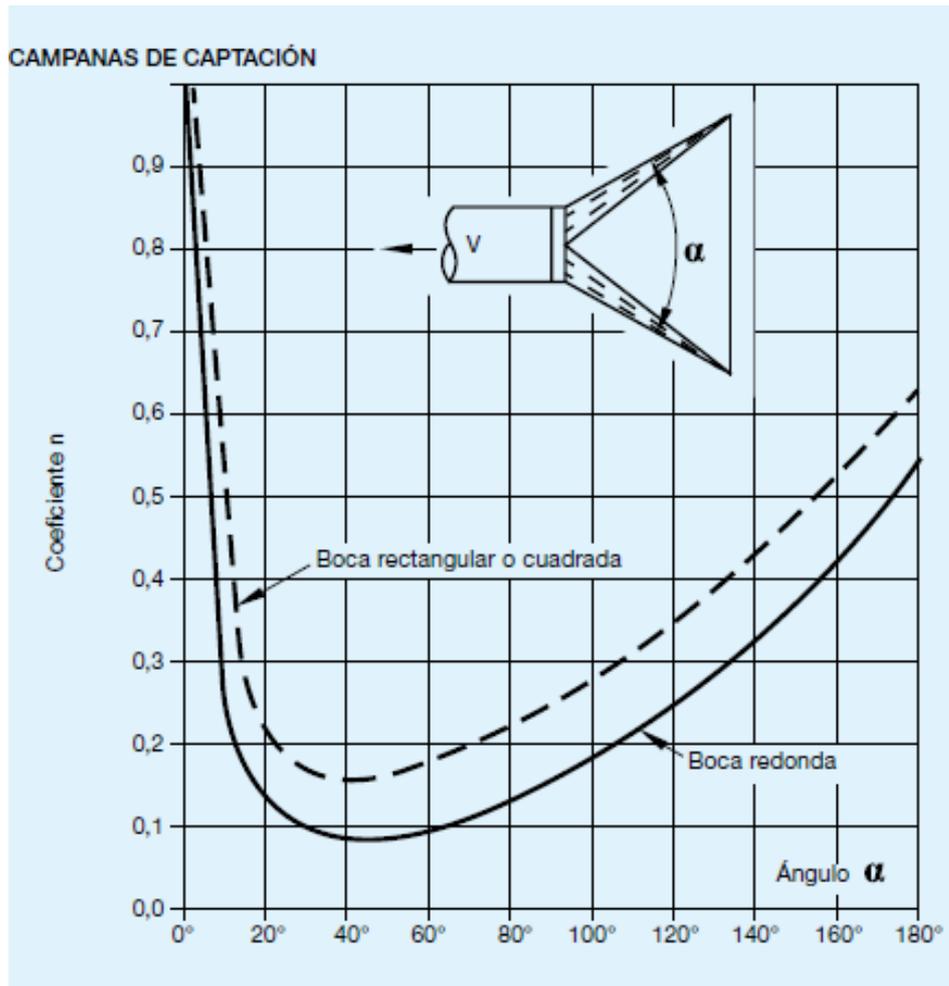
Anexo 13. Clasificación de colores que transportan fluidos.

FLUIDO	CATEGORIA	COLOR
AGUA	1	VERDE
VAPOR DE AGUA	2	GRIS PLATA
AIRE Y OXIGENO	3	AZUL
GASES COMBUSTIBLES	4	AMARILLO OCRE
GASES NO COMBUSTIBLES	5	AMARILLO OCRE
ACIDOS	6	ANARANJADO
ALCALIS	7	VIOLETA
LIQUIDOS COMBUSTIBLES	8	CAFÉ
LIQUIDOS NO COMBUSTIBLES	9	NEGRO
VACIO	0	GRIS

AGUA O VAPOR CONTRA INCENDIOS	-	ROJO DE SEGURIDAD
GLP (GAS LICUADO DE PETROLEO)	-	BLANCO

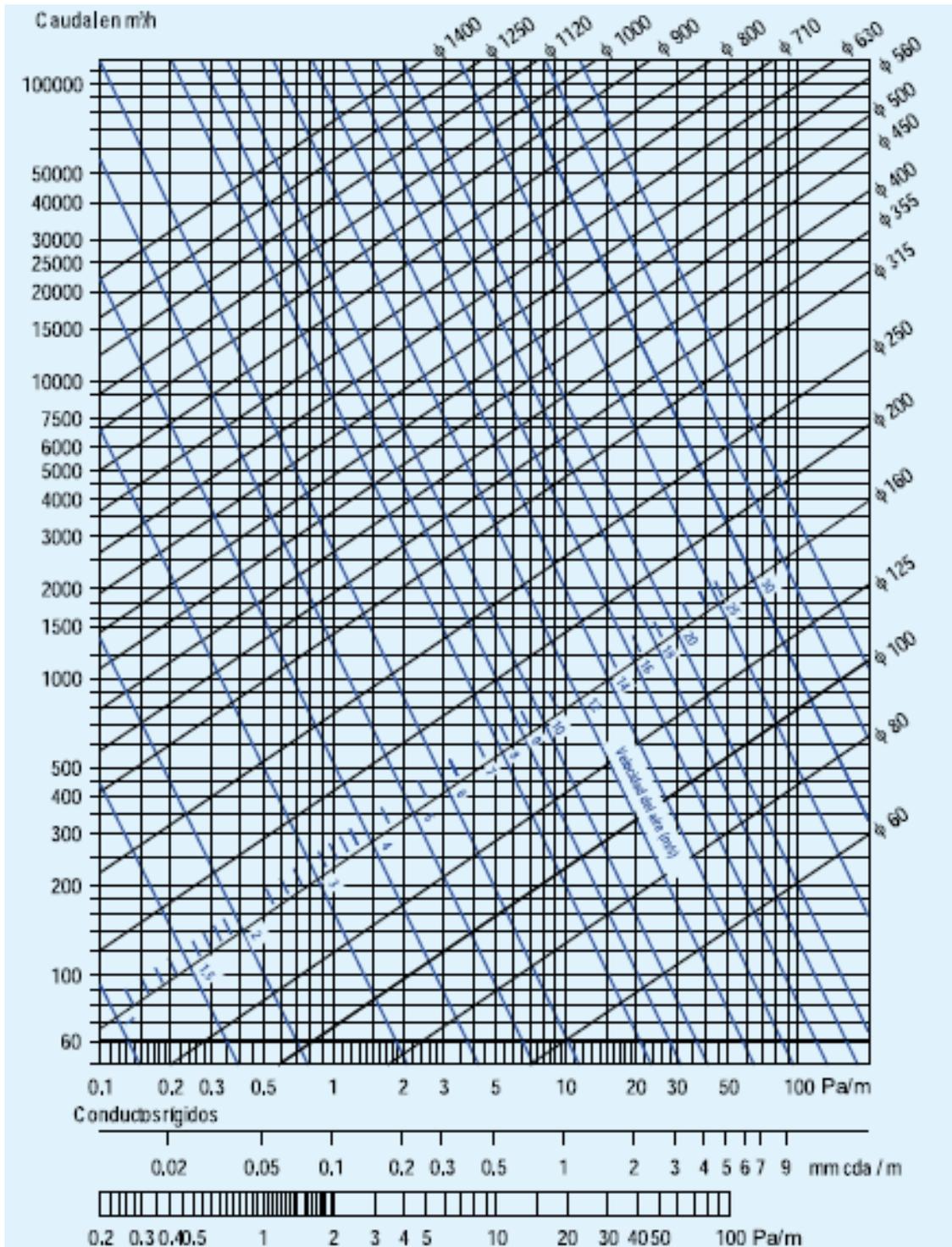
Fuente: (INEN 440, 2004)

Anexo 14. Coeficientes de fricción en campanas de extracción.



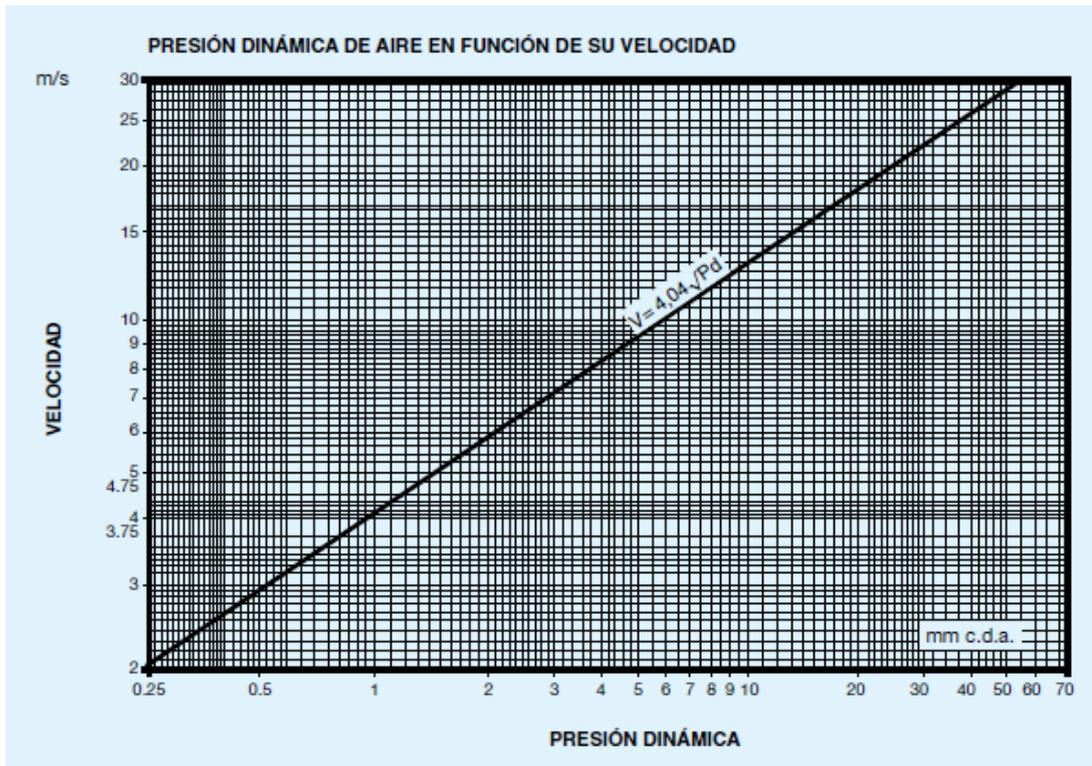
Fuente: (Soler & Palau, 2012)

Anexo 15. Pérdida de carga por rozamiento de aire



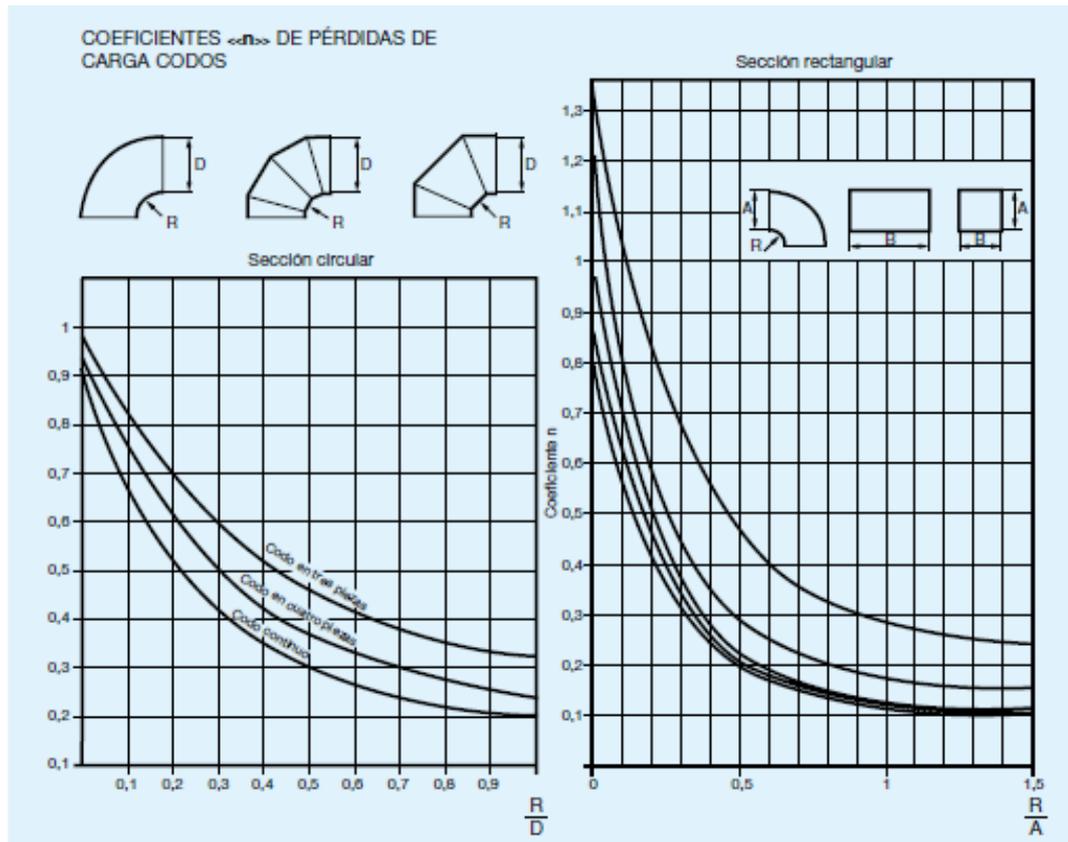
Fuente: (Soler & Palau, 2012)

Anexo 16. Presión dinámica de aire en función de su velocidad.



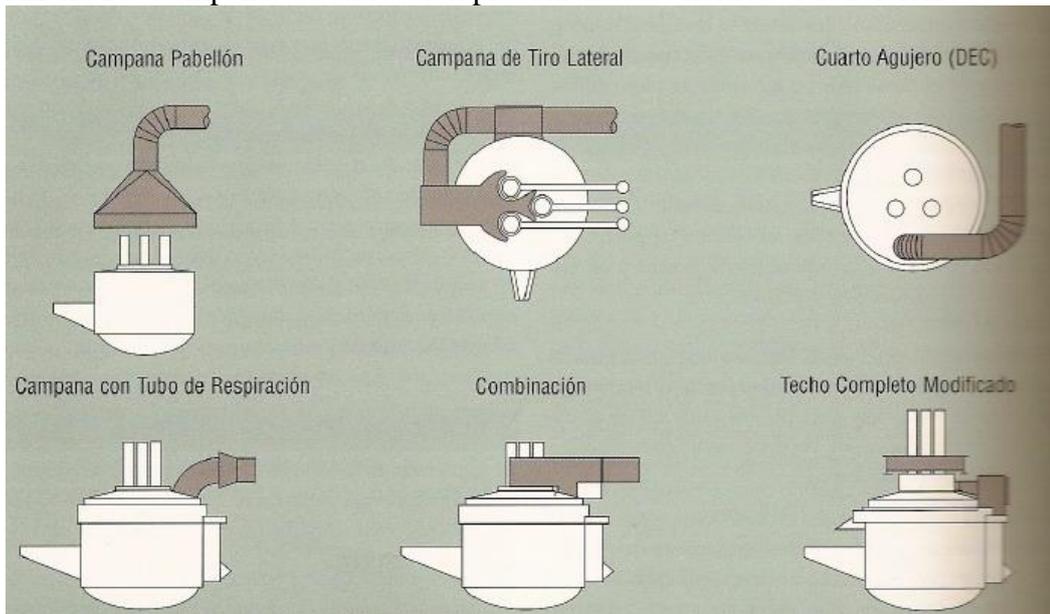
Fuente: (Soler & Palau, 2012)

Anexo 17. Coeficientes de pérdidas de carga en codos.



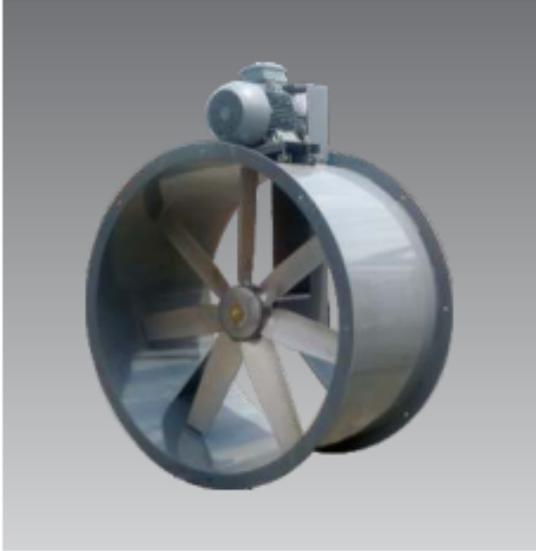
Fuente: (Soler & Palau, 2012)

Anexo 18. Campanas de extracción provenientes de hornos de fundición.



Fuente: (Chiquito, 2006)

Anexo 19. Características técnicas del extractor tubo axial.



Esta gama de extractores tubo axiales han sido desarrollados para manejo de aire en conductos para aplicación en sistemas de ventilación comercial o industrial, brindando gran prestación de caudal y una presión media que garantizan una alta eficiencia en estos equipos.

Características Principales:

Hélice fabricada en aluminio fundido de alta calidad, lo cuál brinda una excelente resistencia a la corrosión, un muy bajo peso y resulta ideal para el tipo de arreglo anti-chispa, debido a la ausencia de material ferroso. Además, cuenta con protección de poleas y bandas, motor externo al paso del aire y carcasa tubular fabricada en acero.

Aplicaciones:

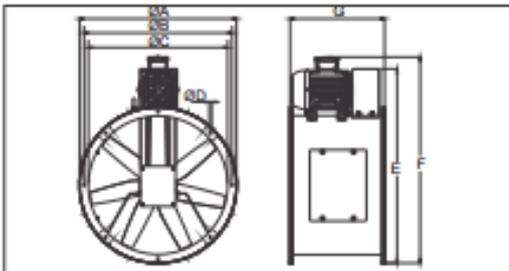
Campanas de extracción, cuartos de pintura, instalaciones en ducto donde sea necesario la impulsión de aire, estacionamientos, procesos industriales específicos, etc.

CARACTERÍSTICAS TÉCNICAS

Modelo	Velocidad RPM	Potencia HP	Tensión Volts	Intensidad A	Caudal a descarga libre m ³ /hr / CFM	Presión sonora dB(A)*	Peso aprox. Kg
TAT-630/L	1300	1	208-230/460	3.0/1.5	12,114 / 7,130	68	48
TAT-630/H	1300	2	208-230/460	6.2/3.1	16,638 / 9,793	72	54
TAT-800/L	1400	2	208-230/460	6.2/3.1	20,141 / 11,855	75	70
TAT-800/H	1400	5	208-230/460	15.2/7.6	30,503 / 17,954	79	76
TAT-1000/L	1400	5	208-230/460	15.2/7.6	35,611 / 20,960	81	88
TAT-1000/H	1400	7 1/2	208-230/460	20.2/10.1	53,562 / 31,526	85	100

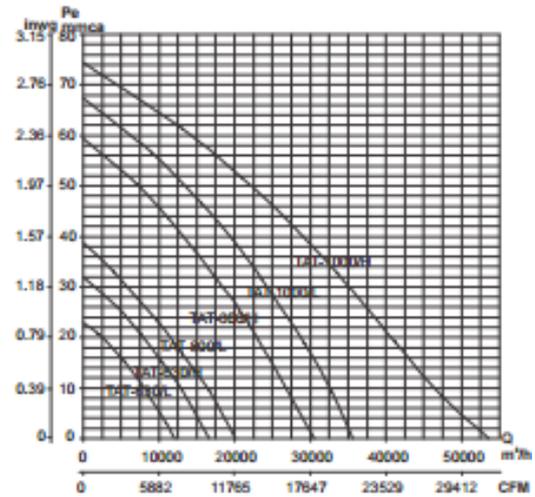
*Nivel sonoro medido de acuerdo a las normas AMCA 300/05 y 301/05

DIMENSIONES Y CURVAS CARACTERÍSTICAS



MODELO	ØA	ØB	ØC	ØD	E	F	G	No.
TAT 630/L	710	670	630	11.1	885	-	427	8
TAT 630/H	710	670	630	11.1	885	939	427	8
TAT 800/L	880	840	800	11.1	1051	1111	427	8
TAT 800/H	880	840	800	11.1	1109	1146	427	8
TAT 1000/L	1119	1069	1115	11.1	1342	1404	609	8
TAT 1000/H	1119	1069	1115	11.1	1342	1444	609	8

*Dimensiones mm.



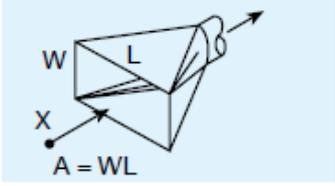
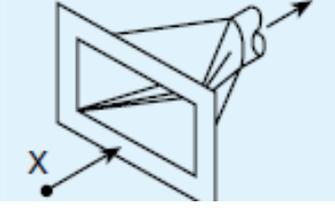
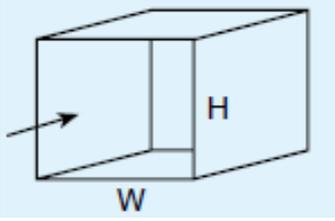
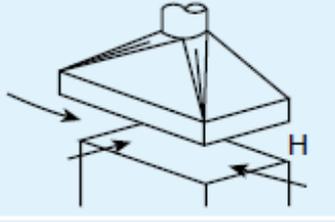
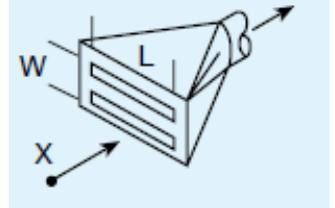
Fuente: (Palau - Soler, 2010)

Anexo 20. Propiedades del agua saturada

Temp., T °C	Presión de saturación, P_{sat} , kPa	Densidad, ρ kg/m ³		Entalpia de vaporización, h_{fg} , kJ/kg	Calor específico, c_p , J/kg · K		Conductividad térmica, k W/m · K		Viscosidad dinámica, μ kg/m · s		Número de Prandtl, Pr		Coeficiente de expansión volumétrica, β 1/K
		Líquido	Vapor		Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	Líquido	Vapor	
0.01	0.6113	999.8	0.0048	2 501	4 217	1 854	0.561	0.0171	1.792×10^{-3}	0.922×10^{-5}	13.5	1.00	-0.068×10^{-3}
5	0.8721	999.9	0.0068	2 490	4 205	1 857	0.571	0.0173	1.519×10^{-3}	0.934×10^{-5}	11.2	1.00	0.015×10^{-3}
10	1.2276	999.7	0.0094	2 478	4 194	1 862	0.580	0.0176	1.307×10^{-3}	0.946×10^{-5}	9.45	1.00	0.733×10^{-3}
15	1.7051	999.1	0.0128	2 466	4 186	1 863	0.589	0.0179	1.138×10^{-3}	0.959×10^{-5}	8.09	1.00	0.138×10^{-3}
20	2.339	998.0	0.0173	2 454	4 182	1 867	0.598	0.0182	1.002×10^{-3}	0.973×10^{-5}	7.01	1.00	0.195×10^{-3}
25	3.169	997.0	0.0231	2 442	4 180	1 870	0.607	0.0186	0.891×10^{-3}	0.987×10^{-5}	6.14	1.00	0.247×10^{-3}
30	4.246	996.0	0.0304	2 431	4 178	1 875	0.615	0.0189	0.798×10^{-3}	1.001×10^{-5}	5.42	1.00	0.294×10^{-3}
35	5.628	994.0	0.0397	2 419	4 178	1 880	0.623	0.0192	0.720×10^{-3}	1.016×10^{-5}	4.83	1.00	0.337×10^{-3}
40	7.384	992.1	0.0512	2 407	4 179	1 885	0.631	0.0196	0.653×10^{-3}	1.031×10^{-5}	4.32	1.00	0.377×10^{-3}
45	9.593	990.1	0.0655	2 395	4 180	1 892	0.637	0.0200	0.596×10^{-3}	1.046×10^{-5}	3.91	1.00	0.415×10^{-3}
50	12.35	988.1	0.0831	2 383	4 181	1 900	0.644	0.0204	0.547×10^{-3}	1.062×10^{-5}	3.55	1.00	0.451×10^{-3}
55	15.76	985.2	0.1045	2 371	4 183	1 908	0.649	0.0208	0.504×10^{-3}	1.077×10^{-5}	3.25	1.00	0.484×10^{-3}
60	19.94	983.3	0.1304	2 359	4 185	1 916	0.654	0.0212	0.467×10^{-3}	1.093×10^{-5}	2.99	1.00	0.517×10^{-3}
65	25.03	980.4	0.1614	2 346	4 187	1 926	0.659	0.0216	0.433×10^{-3}	1.110×10^{-5}	2.75	1.00	0.548×10^{-3}
70	31.19	977.5	0.1983	2 334	4 190	1 936	0.663	0.0221	0.404×10^{-3}	1.126×10^{-5}	2.55	1.00	0.578×10^{-3}
75	38.58	974.7	0.2421	2 321	4 193	1 948	0.667	0.0225	0.378×10^{-3}	1.142×10^{-5}	2.38	1.00	0.607×10^{-3}
80	47.39	971.8	0.2935	2 309	4 197	1 962	0.670	0.0230	0.355×10^{-3}	1.159×10^{-5}	2.22	1.00	0.653×10^{-3}
85	57.83	968.1	0.3536	2 296	4 201	1 977	0.673	0.0235	0.333×10^{-3}	1.176×10^{-5}	2.08	1.00	0.670×10^{-3}
90	70.14	965.3	0.4235	2 283	4 206	1 993	0.675	0.0240	0.315×10^{-3}	1.193×10^{-5}	1.96	1.00	0.702×10^{-3}
95	84.55	961.5	0.5045	2 270	4 212	2 010	0.677	0.0246	0.297×10^{-3}	1.210×10^{-5}	1.85	1.00	0.716×10^{-3}
100	101.33	957.9	0.5978	2 257	4 217	2 029	0.679	0.0251	0.282×10^{-3}	1.227×10^{-5}	1.75	1.00	0.750×10^{-3}
110	143.27	950.6	0.8263	2 230	4 229	2 071	0.682	0.0262	0.255×10^{-3}	1.261×10^{-5}	1.58	1.00	0.798×10^{-3}
120	198.53	943.4	1.121	2 203	4 244	2 120	0.683	0.0275	0.232×10^{-3}	1.296×10^{-5}	1.44	1.00	0.858×10^{-3}
130	270.1	934.6	1.496	2 174	4 263	2 177	0.684	0.0288	0.213×10^{-3}	1.330×10^{-5}	1.33	1.01	0.913×10^{-3}
140	361.3	921.7	1.965	2 145	4 286	2 244	0.683	0.0301	0.197×10^{-3}	1.365×10^{-5}	1.24	1.02	0.970×10^{-3}
150	475.8	916.6	2.546	2 114	4 311	2 314	0.682	0.0316	0.183×10^{-3}	1.399×10^{-5}	1.16	1.02	1.025×10^{-3}
160	617.8	907.4	3.256	2 083	4 340	2 420	0.680	0.0331	0.170×10^{-3}	1.434×10^{-5}	1.09	1.05	1.145×10^{-3}
170	791.7	897.7	4.119	2 050	4 370	2 490	0.677	0.0347	0.160×10^{-3}	1.468×10^{-5}	1.03	1.05	1.178×10^{-3}
180	1 002.1	887.3	5.153	2 015	4 410	2 590	0.673	0.0364	0.150×10^{-3}	1.502×10^{-5}	0.983	1.07	1.210×10^{-3}
190	1 254.4	876.4	6.388	1 979	4 460	2 710	0.669	0.0382	0.142×10^{-3}	1.537×10^{-5}	0.947	1.09	1.280×10^{-3}
200	1 553.8	864.3	7.852	1 941	4 500	2 840	0.663	0.0401	0.134×10^{-3}	1.571×10^{-5}	0.910	1.11	1.350×10^{-3}
220	2 318	840.3	11.60	1 859	4 610	3 110	0.650	0.0442	0.122×10^{-3}	1.641×10^{-5}	0.865	1.15	1.520×10^{-3}
240	3 344	813.7	16.73	1 767	4 760	3 520	0.632	0.0487	0.111×10^{-3}	1.712×10^{-5}	0.836	1.24	1.720×10^{-3}
260	4 688	783.7	23.69	1 663	4 970	4 070	0.609	0.0540	0.102×10^{-3}	1.788×10^{-5}	0.832	1.35	2.000×10^{-3}
280	6 412	750.8	33.15	1 544	5 280	4 835	0.581	0.0605	0.094×10^{-3}	1.870×10^{-5}	0.854	1.49	2.380×10^{-3}
300	8 581	713.8	46.15	1 405	5 750	5 980	0.548	0.0695	0.086×10^{-3}	1.965×10^{-5}	0.902	1.69	2.950×10^{-3}
320	11 274	667.1	64.57	1 239	6 540	7 900	0.509	0.0836	0.078×10^{-3}	2.084×10^{-5}	1.00	1.97	—
340	14 586	610.5	92.62	1 028	8 240	11 870	0.469	0.110	0.070×10^{-3}	2.255×10^{-5}	1.23	2.43	—
360	18 651	528.3	144.0	720	14 690	25 800	0.427	0.178	0.060×10^{-3}	2.571×10^{-5}	2.06	3.73	—
374.14	22 090	317.0	317.0	0	∞	∞	∞	∞	0.043×10^{-3}	4.313×10^{-5}	—	—	—

Fuente: (Cengel, 2007)

Anexo 21. Fórmulas para el cálculo del caudal en campanas simples.

Tipo de campana	Descripción	Caudal
	Campana simple	$Q=V(10*2 + A)$
	Campana simple con pestaña	$Q=0.75*V(10*2 + A)$
	Cabina	$Q=VA=VWH$
	Campana cuadrada elevada	$Q=3600*LVH$ L: lado H: altura sobre la operación.
	Rendija múltiple, 2 ó más rendijas	$Q=V(10*2 + A)$

Fuente: (Soler & Palau, 2012)