



**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**DIRECCIÓN DE POSGRADOS**

**PORTADA**

Protocolo del Trabajo de Proyecto de Investigación y Desarrollo en opción al  
Grado Académico de Magister en “GESTIÓN DE ENERGÍAS”.

**TEMA::**

**“Evaluación del funcionamiento técnico del horno de cubilote en la fundición de hierro  
de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato para la mejora de la  
eficiencia térmica. Propuesta de reformas técnicas al horno”**

Autor :

.....  
TIRADO Gallo, Inés Georgina

Tutor:

.....  
Ing. Enrique Torres PhD.

**LATACUNGA – ECUADOR**

Julio – 2018



# UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI

UNIDAD DE POSGRADO

Latacunga – Ecuador

---

## APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO

En calidad de miembros de Tribunal de Grado, aprueban el presente informe e investigación de postgrados de la Universidad Técnica de Cotopaxi; por cuanto, el maestrante: Tirado Gallo Inés Georgina, con título de tesis: **“Evaluación del funcionamiento técnico del horno de cubilote en la fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato para la mejora de la eficiencia térmica. Propuesta de reformas técnicas al horno”**. Ha 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, julio 2018

Para constancia firman:

.....  
MSc.

PRESIDENTE

.....  
PhD.

MIEMBRO

## **AVAL DEL DIRECTOR DEL TESIS**

Latacunga, julio 2018

En mi calidad de Director de la Tesis presentada por Tirado Gallo Inés Georgina, egresada de la maestría de 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**

Yo, Inés Georgina Tirado Gallo, con cédula de identidad 1802026037, declaro que el contenido de la presente Tesis de Grado, es original y de mi exclusiva responsabilidad.

Atentamente,

.....  
Inés Georgina Tirado Gallo  
C.C. 1802026037

## **AGRADECIMIENTO**

Primero agradezco a mi Dios por permitirme seguir adelante, y por ponerme en el camino con personas que han aportado en forma efectiva para el desarrollo de esta investigación, sobre todo al Ing. Patricio Pérez y Rodrigo Tirado quienes con su desapego a sus conocimientos supieron compartirlo en forma desinteresada permitiéndome el uso de la información de sus empresas, al Ing. Víctor Pachacama por su valioso apoyo en la simulación del proyecto, al Ing. Washington Freire por su colaboración en la toma de datos y manejo de equipos, y en especial a mi Director el Ing. Enrique Torres por su valioso contribución en desarrollo y culminación de la tesis.

## **DEDICATORIA**

Este Trabajo está dedicado a mis hijos

Ligia Elena,

Jorge Sebastián y

Rina Marcela

Por el apoyo que me brindan, por el positivismo que emanan pero sobre todo por el valor que me inspiran a seguir adelante.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍA**

**TÍTULO:** Evaluación del funcionamiento técnico del horno de cubilote en la fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato para la mejora de la eficiencia térmica. Propuesta de reformas técnicas al horno.

**AUTOR:** Ing. Inés Georgina Tirado Gallo Mg.

**TUTOR:** PhD Enrique Torres.

**RESUMEN**

A partir de la información experimental se encontraron los parámetros operacionales del horno de cubilote para la fundición de hierro gris a presión constante de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato.

Se determinó pérdidas por transferencia, valores de eficiencia de combustión y eficiencia de fusión, estas eficiencias se evaluaron para el horno de cubilote con coque como único portador energético, y la mejora de la eficiencia fue analizada mediante simulación en un software FEM “ANSYS Academic Student” se utilizó el módulo CFD de ANSYS, que es el fluent.

A partir de los resultados de las comparaciones, la investigación muestra que la implantación de una cámara de calentamiento de aire antes del ingreso a la cámara de viento en el horno de cubilote trae una reducción del consumo de coque y adicionalmente una disminución de las emisiones de gases contaminantes.

La adopción de la cámara de calentamiento del aire será beneficioso para la empresa en cuanto a ahorro de energía y reducción de costes

Se verificó que el cambio del parámetro operacional de la temperatura de entrada del aire a la caja de viento del horno de cubilote mejora la eficiencia de fusión y combustión como señala el análisis bibliográfico de trabajos investigativos de (Golón, 2009) y (Lee., 2003)

Finalmente, se analizó el impacto ambiental antes y después de la mejora al horno de cubilote encontrando una disminución en la emisión de gases contaminantes.

**Descriptor:** horno de fundición de hierro por cubilote e inducción, energía, combustión, eficiencia

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI**  
**UNIDAD DE POSGRADOS**  
**MAESTRÍA EN GESTIÓN DE ENERGÍA**

**TÍTULO:**

**“Evaluation of the technical performance of the cupola furnace in the iron foundry of the Empresa Centro Mecanizado Pérez of the city of Ambato for the improvement of thermal efficiency. Proposal for technical reforms in the furnace”.**

**AUTOR: Ing. Inés Georgina Tirado Gallo Mg.**

**TUTOR: PhD Enrique Torres.**

**ABSTRACT**

Based on the experimental information, the operational parameters of the cupola furnace for the smelting of gray iron at constant pressure of the Company Centro Mecanizado Pérez in Ambato were found.

Transfer losses, combustion efficiency and melting efficiency values were determined, these efficiencies were evaluated for the cupola furnace with coke as the sole energy carrier, and the efficiency improvement was analyzed by simulation in FEM "ANSYS Academic Student" software using the ANSYS CFD module, which is the fluent.

Based on the results of the comparisons, the research shows that the installation of an air heating chamber before entering the wind chamber in the cupola furnace leads to a reduction in the consumption of coke and, in addition, a reduction in the emission of polluting gases. The adoption of the air heating chamber will be beneficial for the company in terms of energy savings and cost reduction.

It was verified that the change of the operational parameter of the air inlet temperature to the cupola furnace wind box improves the melting and combustion efficiency as indicated by the bibliographic analysis of research works by (Golón, 2009) and (Lee., 2003).

Finally, the environmental impact before and after the improvement to the cupola furnace was analyzed, finding a decrease in the emission of contaminating gases.

Descriptors: cast-iron cupola and induction furnace, energy, combustion, efficiency.



## ÍNDICE DE CONTENIDOS

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRIBUNAL DE GRADO .....	ii
AVAL DEL DIRECTOR DEL TESIS .....	iii
RESPONSABILIDAD POR LA AUTORÍA DE TESIS .....	iv
AGRADECIMIENTO .....	v
RESUMEN .....	vii
ABSTRACT .....	viii
ÍNDICE DE CONTENIDOS.....	ix
ÍNDICE DE FIGURAS .....	xiii
ÍNDICE DE TABLAS .....	xiv
INTRODUCCIÓN .....	1
JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN.....	2
OBJETO Y PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN .....	2
CAPÍTULO 1 .....	10
MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO SOBRE EL HORNO DE CUBILOTE EN LA FUNDICIÓN DE HIERRO.....	10
1.1. Introducción .....	10
1.2. Caracterización del objeto .....	10
1.2.1. Descripción del objeto.....	11
1.2.2. Delimitación espacio -temporal .....	11
1.3. Marco teórico de la investigación .....	11
1.3.1. Antecedentes de la investigación.....	11
1.4. Fundamentación de la investigación.....	14
1.5. Operacionalización de las variables .....	16
1.6. Fundamentación Legal .....	19
1.6.1. Sección segunda. Ambiente sano.....	19
1.6.2. Sección séptima Biosfera, ecología urbana y energías alternativas .....	19
1.7. Antecedentes de estudio .....	20
1.8. Fundamentación teórica. ....	21
1.8.1. Proceso de fundición.....	22
1.8.2. Características de los hornos .....	22
1.8.3. Horno de cubilote.....	23

1.8.4. Horno de inducción .....	23
1.8.5. Energía.....	24
1.8.6. Energía térmica .....	25
1.8.7. Transferencia de calor.....	25
1.8.8. Transferencia de calor por conducción.....	26
1.8.9. Transferencia de calor por convección .....	27
1.8.10. Transferencia de calor por radiación .....	28
1.8.11. Combustible y combustión.....	29
1.9. Conclusiones del capítulo.....	31
CAPÍTULO 2 .....	32
2.1. Introducción .....	32
2.2. Energía requerida para llevar a cabo la fusión del hierro .....	33
2.3. Calor perdido al ambiente.....	36
2.3.1. Las pérdidas de calor por las paredes:.....	37
2.3.2. Resistencia térmica involucrada en el proceso de fundición en el horno de cubilote .....	37
2.3.3. Cálculo de los coeficientes de transferencia.....	41
2.3.4. Cálculo de la resistencia global del sistema .....	44
2.3.5. Cálculo del calor de conducción y convección.....	44
2.3.6. Cálculo de los calores perdidos.....	44
2.3.7. Calor total perdido .....	46
2.3.8. Pérdidas en los gases de escape .....	46
2.4. Parte experimental.....	50
2.4.1. Ingreso de calor.....	50
2.4.2. Salida de calor .....	51
2.4.3. Eficiencia térmica .....	51
2.5. Simulación ANSYS.....	51
2.5.1. Modelado computacional CFD en ANSYS.....	52
2.6. Conclusiones del capítulo.....	52
CAPÍTULO 3 .....	54
3.1. Introducción .....	54
3.2. Cálculo de la energía para la fundición del hierro gris.....	55
3.3. Determinación de las pérdidas de energía por transferencia de calor de las paredes.....	57
3.4. Determinación de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la chimenea.....	59
3.5. Determinación de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la base.....	61

3.6. Determinación de las pérdidas de calor por gases de combustión. ....	62
3.7. Balance térmico del cubilote.....	65
3.8. Modelado computacional CFD en ANSYS.....	68
3.8.1. Simulación del horno mejorado. ....	68
3.9. Simulación del horno de cubilote usando Ansys.....	68
3.9.1. Modelo CAD del horno de cubilote.....	68
3.9.2. Mallado de los modelos. ....	69
3.9.3. Diagrama de manejo de programa. ....	69
3.10. Conclusiones del capítulo.....	70
CAPÍTULO 4 .....	71
4. PROPUESTA DE MEJORA ENERGÉTICA EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE HIERRO FUNDIDO.....	71
4.1. Introducción. ....	71
4.2. Título de la propuesta. ....	71
4.3. Justificación de la propuesta. ....	71
4.3.1. Metodología. ....	72
4.4. Estructura de la propuesta.....	73
4.5. Desarrollo de la propuesta.....	74
4.5.1. Investigación bibliográfica.....	74
4.5.2. Cámara de calentamiento.....	77
4.5.3. Dimensionamiento de la cámara de calentamiento .....	78
4.5.4. Estimación del coeficiente global U de transmisión de calor. ....	80
4.5.5. Determinación de los coeficientes de transferencia.....	81
4.5.6. Determinación De la diferencia media logarítmica y la eficiencia de la cámara de calentamiento. ....	81
4.5.7. Selección del extractor .....	82
4.6. Simulación .....	83
4.6.1. Simulación de los hornos de cubilote actual.....	84
4.6.2. Simulación de la cámara de calentamiento y el prototipo mejorado .....	86
4.6.3. Comparación de los hornos de cubilote actual con la mejora .....	88
4.7. Valoración económica de la propuesta.....	89
4.8. Estudio ambiental. ....	93
4.9. Conclusiones del capítulo.....	94
CONCLUSIONES GENERALES .....	95
RECOMENDACIONES .....	96

ANEXOS .....	97
ANEXO A: CÁMARA TERMOGRÁFICA DE FLUKE.....	98
ANEXO B: DATOS DE TEMPERATURA TOMADOS [°C] CON LA CÁMARA TERMOGRÁFICA FLUKE .....	99
ANEXO C: PLANO DE LA CÁMARA DE CALENTAMIENTO.....	100
ANEXO D: VARIAS SIMULACIONES DEL HONO DE CUBILOTE ACTUAL Y MEJORADO .....	101
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	103
BIBLIOGRAFÍA.....	103

## ÍNDICE DE FIGURAS

<b>Figura N° 1. 1.</b> Árbol de problemas con las causas y efectos que intervienen en la investigación .....	15
<b>Figura N° 1. 2.</b> Esquema del horno de cubilote.....	23
<b>Figura N° 1. 3.</b> Componentes básicos de un horno de inducción.....	24
<b>Figura N° 1. 4.</b> Signos para la transformación de calor por conducción .....	26
<b>Figura N° 1. 5.</b> Variación de la temperatura y velocidad de un fluido sobre una placa plana en convección forzado .....	27
<b>Figura N° 1. 6.</b> Esquema de las áreas de proceso de fundición.....	31
<b>Figura N° 2. 1.</b> Dimensiones del horno de cubilote de la empresa Centro Mecanizado Pérez .....	32
<b>Figura N° 2. 2.</b> Zonas en el horno de cubilote.....	34
<b>Figura N° 2. 3.</b> Gradiente de temperatura en el horno de cubilote .....	37
<b>Figura N° 2. 4.</b> Gradiente de resistencia en serie en el horno de cubilote .....	38
<b>Figura N° 2. 5.</b> Distribución de temperatura y circuito térmico equivalente a través de la pared cilíndrica del horno de cubilote. ....	41
<b>Figura N° 3. 1.</b> Esquema de carga en el horno de cubilote.....	54
<b>Figura N° 3. 2.</b> Curva de calentamiento del hierro fundido temperatura vs tiempo.....	56
<b>Figura N° 4. 1.</b> Diagrama P&ID del proceso de fundición del horno actual .....	75
<b>Figura N° 4. 2.</b> Diagrama P&ID del proceso mejorado .....	76
<b>Figura N° 4. 3.</b> Diagrama de la cámara de calentamiento. ....	77
<b>Figura N° 4. 4.</b> Configuración del intercambiador de calor, vista transversa.....	79
<b>Figura N° 4. 5.</b> Temperaturas consideradas para el dimensionamiento del intercambiador .....	80
<b>Figura N° 4. 6.</b> Disposición de la cámara de calentamiento.....	80
<b>Figura N° 4. 7.</b> Parámetros para la selección de la potencia del extractor .....	83
<b>Figura N° 4. 8.</b> Simulación de la temperatura del horno en ausencia de aire precalentado.....	84
<b>Figura N° 4. 9.</b> Simulación de presiones en el horno de cubilote en ausencia de aire precalentado ....	85
<b>Figura N° 4. 10.</b> Simulación de la energía total para la fusión de 625 kg. de hierro en ausencia de aire precalentado .....	85
<b>Figura N° 4. 11.</b> Simulación de ppm de material no combustionado en el cubilote en ausencia de aire precalentado. ....	86
<b>Figura N° 4. 12.</b> Simulación de las temperaturas del prototipo con la cámara de calentamiento .....	86
<b>Figura N° 4. 13.</b> Simulación de las presiones en el prototipo del horno mejorado .....	87
<b>Figura N° 4. 14.</b> Simulación de los cambio térmicos del prototipo con precalentamiento del aire.....	87
<b>Figura N° 4. 15.</b> Comparación de la energía en porcentaje de los cubilotes actual y mejorado .....	89

## ÍNDICE DE TABLAS

<b>Tabla N° 1. 1.</b> Matriz causa - efecto .....	16
<b>Tabla N° 1. 2.</b> Operacionalización de la variable independiente de la investigación.....	17
<b>Tabla N° 1. 3.</b> Operacionalización de la variable dependiente de la investigación .....	18
<b>Tabla N° 1. 4.</b> Tipos de hornos .....	24
<b>Tabla N° 2. 1.</b> Proceso que se produce en cada zona del horno de cubilote con las temperaturas del cubilote de la Empresa Centro Mecanizado Pérez .....	33
<b>Tabla N° 2. 2</b> Características del combustible usado en el horno de cubilote. ....	47
<b>Tabla N° 3. 1.</b> Resultados obtenidos para alcanzar la temperatura de colada .....	55
<b>Tabla N° 3. 2.</b> Valores obtenidos de las resistencias térmicas de conducción .....	58
<b>Tabla N° 3. 3.</b> Valores obtenidos de los coeficientes de convección .....	58
<b>Tabla N° 3. 4.</b> Valores obtenidos de los coeficientes de convección .....	59
<b>Tabla N° 3. 5.</b> Valores obtenidos de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la chimenea .....	60
<b>Tabla N° 3. 6.</b> Valores obtenidos de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la chimenea. ....	61
<b>Tabla N° 3. 7.</b> Calor de combustión del coque .....	63
<b>Tabla N° 3. 8.</b> Relación aire combustible .....	64
<b>Tabla N° 3. 9.</b> Calor suministrado .....	65
<b>Tabla N° 3. 10.</b> Calor total del sistema.....	66
<b>Tabla N° 3. 11.</b> Valores de eficiencia.....	67
<b>Tabla N° 4. 1.</b> Valores de los parámetros y coeficientes de transferencia calculados para la cámara de calentamiento. ....	81
<b>Tabla N° 4. 2.</b> Valores encontrados de temperatura media logarítmica y la eficiencia de la cámara de calentamiento .....	82
<b>Tabla N° 4. 3.</b> Valores calculados de la temperatura media logarítmica y la eficiencia de la cámara de calentamiento. ....	82
<b>Tabla N° 4. 4.</b> Valores de los calores y eficiencias para el cubilote actual .....	84
<b>Tabla N° 4. 5.</b> Valores de energía que arroja la simulación .....	88
<b>Tabla N° 4. 6.</b> Costos de los materiales para la implementación de la cámara de calentamiento. ....	89
<b>Tabla N° 4. 7.</b> Costos, ingresos y flujos de fondos de la empresa Centro Mecanizado Pérez sin proyecto.....	90
<b>Tabla N° 4. 8.</b> Costos y depreciación de los equipos para la implementación de la propuesta. ....	90
<b>Tabla N° 4. 9.</b> Costos totales e ingresos de la Empresa Centro Mecanizado Pérez con proyecto.....	91
<b>Tabla N° 4. 10.</b> Flujos de caja anuales con proyecto de mejora .....	92
<b>Tabla N° 4. 11.</b> Diferencia de Flujos de caja anuales con y sin proyecto de mejora.....	92
<b>Tabla N° 4. 12.</b> Índices financieros del proyecto de mejora.....	93
<b>Tabla N° 4. 13.</b> Cálculo automático de emisiones totales en relación a los consumos energéticos. ....	93

## **INTRODUCCIÓN**

### **SITUACIÓN PROBLÉMICA**

El hierro en la civilización moderna es el alma de todas las edificaciones, su consumo crece en forma exponencial al pasar de los años, y con ello el uso de cantidades importantes de energía en su transformación de mineral a una gran variedad de aleaciones. La revolución industrial hizo posible la incorporación del coque como portador energético de la fundición del hierro mejorando así las cualidades del hierro fundido obtenido. Así también conforme avanza la civilización los requerimientos cada vez son más exigentes, no solo en lo que se refiere a la producción del material sino los efectos que provocan en el entorno donde están siendo obtenidos; ya que existen regulaciones que se debe considerar y que en épocas pasadas no eran tomadas en cuenta.

La energía como insumo básico para el desarrollo del país requiere el uso racional y óptimo, Esto hace vislumbrar que el sistema de fundición de hierro por cubilote, que ha sido utilizado por más de dos siglos, como uno de los sistemas de fundición más óptimos está llegando a su fin.

El problema latente que enfrenta este tipo de horno es el consumo de coque como portador energético único, lo que induce a problemáticas que hoy en día están siendo reguladas y llegará el momento en que este tipo de contaminación ambiental será vetada, pues existe emanación de gases tóxicos, por otra parte, las exigencias de la seguridad industrial que se está expandiendo en la industria actual, donde el consumo excesivo del portador energético, está censurado; así también la polución a la que están expuestos los obreros que trabajan en esta actividad.

Otro aspecto que hay que considerar es que en Ecuador no se cuenta con minas de coque y la importación es obligatoria, lo que, requiere de un costo adicional por aranceles que pueden ser variables. Esta es una razón más para buscar alternativas que mejoren la eficiencia del horno utilizando su propia energía desperdiciada.

El trabajo de investigación busca hacer una evaluación técnica que permita optimizar el consumo total de energía, disminuir la contaminación ambiental y la polución.

### **JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

Las empresas de hoy en día, están sujetas a búsquedas incansables por ser más eficientes y cumplir estándares que cada vez son más exigentes, y es lo que la Empresa Centro mecanizado Pérez requiere. Aprovechar los recursos energéticos y mejorar la calidad del hierro fundido para lograr alcanzar estándares que se requiere para mantenerse en el mercado de la industria metal mecánica.

El horno de cubilote tiene subutilizada la energía emitida por la combustión del coque, hay que investigar el funcionamiento de los parámetros operacionales que permitan mejorar la eficiencia térmica y así disminuir el consumo del portador energético coque. Además se busca en forma imperioso trabajar con procesos altamente eficientes y amigables con el medio ambiente y de baja polución en el ámbito laboral.

La dificultad que representa mantener todos los diversos factores a punto para mantener un buen rendimiento del horno de cubilote los hace menos atractivo para una inversión futura, sin embargo se puede lograr reducir en algo el consumo de coque al instalar un dispositivo que permita recoger las pérdidas energéticas que se emiten en el horno, sobre todo por la chimenea.

### **OBJETO Y PROBLEMA DE LA INVESTIGACIÓN**

#### **Objeto de estudio**

Horno de fundición de hierro tipo cubilote de la Empresa Centro Mecanizado Pérez, de la ciudad de Ambato.

#### **Formulación del problema de investigación**

¿Cómo incide los parámetros operacionales del horno de cubilote en la fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato, en la eficiencia térmica?



## **CAMPO DE ACCIÓN Y OBJETIVO GENERAL DE LA INVESTIGACIÓN**

### **Campo de acción**

Eficiencia térmica en el horno de cubilote de la fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez, de la ciudad de Ambato.

### **Objetivo General**

Evaluar los parámetros operacionales del horno de cubilote en la fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez, de la ciudad de Ambato, y su influencia para la mejora en la eficiencia energética del mismo.

## **HIPÓTESIS DE INVESTIGACIÓN**

El conocimiento de la evaluación del funcionamiento técnico del horno de cubilote en la fundición de hierro en la Empresa Centro Mecanizado Pérez, permitirá controlar las pérdidas de calor e incrementar la eficiencia energética al proponer una mejora en el horno o cambios tecnológicos.

### **Objetivo específico de investigación**

- Analizar el estado del arte del horno de cubilote en la fundición de hierro y su relación con el objeto de estudio.
- Calcular las pérdidas de calor provocadas desde el interior del horno de cubilote en la fundición de hierro y su influencia en la eficiencia térmica.
- Determinar la eficiencia térmica actual del horno de fundición de cubilote de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez, de la ciudad de Ambato.
- Determinar la propuesta y simulación de la implementación de la mejora de recuperación de las pérdidas de calor del horno de cubilote.
- Determinar la propuesta y la inversión necesaria para trabajar con los cambios de la mejora en el horno de cubilote.

## SISTEMA DE TAREAS POR OBJETIVOS ESPECÍFICOS

1. Se analiza el estado del arte de los diferentes tipos de hornos de fundición de hierro y su relación con el objeto de estudio.

a. Se realiza una búsqueda exhaustiva de investigaciones relacionadas con el objeto de estudio.

MÉTODO	PROCEDIMIENTO	TÉCNICA
Observación	Investigar sobre las diferentes tipos de hornos de fundición de hierro.	Observación

b. Se elabora resúmenes de los temas investigados, de forma global, buscando una idea bien definida de lo que se realizará en investigación con respecto al objeto de estudio.

MÉTODO	PROCEDIMIENTO	TÉCNICA
Inductivo	Reconocer lo esencial de los resúmenes de las diversas investigaciones	Observación

2. Calcular las pérdidas de calor provocadas desde el interior del horno de cubilote en la fundición de hierro y su influencia en la eficiencia térmica.

a. Se realiza mediciones de temperatura de las diferentes partes del horno, para determinar las pérdidas y su influencia en la eficiencia térmica

MÉTODO	PROCEDIMIENTO	TÉCNICA
Observación experimental	<p>Monitorear las temperaturas en las diferentes partes del horno con la finalidad de realizar una distribución de temperaturas desde el interior hacia los alrededores.</p> <p><b>Instrumentos usados:</b> Cámara termográfica, pirómetro.</p>	Guía de observación

b. Se realiza una simulación de la distribución de temperaturas de las diferentes partes del horno de fundición de hierro, y su influencia en las partes críticas donde ocurre la mayor pérdida de energía térmica.

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación inductivo	Simular la distribución de temperaturas desde el interior del horno hacia los alrededores	Software

- c. Se contrasta los valores obtenidos por el software de simulación con los obtenidos en el método experimental, para encontrar posibles soluciones al incremento de la eficiencia térmica del horno de fundición de hierro.

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación Comparativo	Analizar y comparar los resultados otorgados por los dos métodos para el aumento de la eficiencia energética	Observación, Software

3. Se determina la eficiencia térmica actual del horno de fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez ubicada en la ciudad de Ambato.

- a. Realizar un balance de masa y energía en el horno tipo cubilote para establecer la eficiencia energética.

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación Inductivo	Calcular la eficiencia actual del horno de cubilote para la fundición de hierro	Medición y cálculo

4. Se determina la propuesta y se realiza una simulación de la implementación de la mejora de recuperación de las pérdidas de calor del horno de cubilote.

- a. Se investiga los posibles desventajas que tiene el horno de hierro para con el conocimiento adecuado de sus variables se pueda establecer estrategias que disminuyan perdidas caloríficas y aumenten la eficiencia energética.

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación inductivo	Conocer la operación del horno y el manejo de sus variables operacionales	Observación

- b. Se compara la eficiencia térmica calculada, con la mejora simulada al optimizar los parámetros operacionales del horno de fundición de hierro por cubilote

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación Inductivo	Contrastar las eficiencias térmicas al modificar los parámetros operacionales con la eficiencia actual	Medición y cálculo

5. Se determina la propuesta y la inversión necesaria para trabajar con los cambios de la mejora en el horno de cubilote.

- a. Se obtiene información en el departamento de fundición de la empresa Centro mecanizado Pérez, a cerca del consumo del coque, y materias primas utilizadas para la fundición, así determinar el costo del proceso de fundición

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación Inductivo	Obtener las facturas de consumos, así como registros de utilización del coque y materias primas para la determinación del costo la fundición del mismo.	Observación y cálculo

- b. Se efectúa una valoración técnica y ambiental acerca del mejoramiento en la calidad del proceso de fundición de hierro.

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación deductivo	Efectuar un análisis de forma técnica y ambiental del proceso de fundición de hierro.	Observación

- c. Se realiza una estimación de forma económica, de la rentabilidad de tener un sistema de recuperación de los gases chimenea, que a la vez sea un recogedor de material particulado y calentador de aire para que a las toberas ingrese aire caliente.

<b>MÉTODO</b>	<b>PROCEDIMIENTO</b>	<b>TÉCNICA</b>
Observación Inductivo	Establecer de forma económica la rentabilidad de poseer un sistema que a la vez funcione como extractor, recogedor y calentador.	Medición y cálculo

## VISIÓN EPISTEMOLÓGICA DE LA INVESTIGACIÓN

### **Paradigma o enfoque epistemológico**

La finalidad de la investigación tiene como meta una comparación de las eficiencias térmicas de las condiciones actuales del horno de cubilote y la condición más favorable al realizar una modificación en la fundición de hierro, apoyándose en aspectos cualitativos y cuantitativos.

Se realizara mediciones directas al horno en funcionamiento, y se determinará los focos de perdidas caloríficas, se sugerirá un posible cambio en su estructura para su aprovechamiento.

Dicho aprovechamiento se simulara apoyado de un software de elementos finitos, como es el Ansys determinándose la mejor opción que tiene el mayor beneficio. La simulación utiliza un enfoque **Racionalista-deductivo** el cual consta de:

**Método de hallazgo: Deductivo.-** Debido a que se procede de una necesidad general para definir los subsistemas particulares que permitirán mejoras en la eficiencia.

**Método de contrastación: Experimental.-** Para determinar el correcto funcionamiento del simulador, se debe experimentar un gran número de veces,

### **ALCANCE DE LA INVESTIGACIÓN**

El tipo de investigación que se llevará es la investigación explicativa (Arias, 2006) asegura que: “La investigación explicativa se encarga de buscar el por qué 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 una prueba de hipótesis. Sus resultados y conclusiones constituyen el nivel más profundo de conocimientos.

En esta investigación se evaluará el consumo de coque, se analizará los parámetros operacionales que conlleven a una mejora de la eficiencia térmica del horno de cubilote de a fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato.

Se analizan las diferentes zonas del horno de cubilote, ya que estas al no trabajar en su punto de máxima eficiencia se necesita mayor cantidad de suministros para lograr igual cantidad de producto, pueden afectar tanto en disminución de la cantidad producida del producto, mayor tiempo de producción, aumento del consumo de recursos: chatarra, coque, fundente, mano de obra, tiempo, entre otros.

Es decir se trata de minimizar las pérdidas caloríficas que permitan que los parámetros operacionales del horno de cubilote mantengan al horno con alta eficiencia.

### **CAMPO DE ACCIÓN**

Eficiencia térmica en el horno de cubilote de la fundición de hierro de la Empresa Centro Mecanizado Pérez, de la ciudad de Ambato.

### **DESCRIPCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN Y DESARROLLO**

La investigación tiene por objeto mejorar la eficiencia del horno tipo cubilote para la fundición de hierro, para ello se realiza una evaluación de los parámetros operacionales del horno actual y se simula posibles mejoras al proponer un dispositivo que permite la recuperación de las pérdidas caloríficas.

La investigación comienza con una contextualización seguida de la determinación del objeto de investigación, la justificación y se enuncian los objetivos.

El trabajo se divide en 4 capítulos:

En el capítulo 1, Se realiza dos estudios, en el primero al marco teórico caracterizando el objeto de la investigación y el segundo a las investigaciones previas que contribuyen al desarrollo del trabajo.

En el capítulo 2, se refiere a la metodología seguida en la investigación, los pasos que se siguen como: caracterización del sistema de estudio, diseño de experimentos, determinación

de parámetros de medida, indicadores, técnicas usadas, el procedimiento para ejecutar y validar el proyecto de investigación.

Los resultados y análisis de la investigación están en el capítulo 3, se determina a través de balances de masa y energía los requerimientos de energía utilizada a partir de datos reales utilizados en la fundición de hierro, determinando la eficiencia actual del horno, de igual manera se aplica un software especializado y se compara las eficiencias obtenidas.

Finalmente, este estudio sirve para proponer mejoras, esta mejora se plasma en el capítulo 4 donde se propone una recuperación de los gases de salida en la chimenea para mejorar la eficiencia del horno de cubilote.

## **CAPÍTULO 1**

### **MARCO CONCEPTUAL Y TEÓRICO SOBRE EL HORNO DE CUBILOTE EN LA FUNDICIÓN DE HIERRO**

#### **1.1. Introducción**

Según (Rivera, 1998) “Construir el marco teórico, en una investigación, no busca únicamente conocer trabajos similares, sino compenetrarse con las actividades que permitan tener un verdadero sentido de las acciones que se realizaran en este trabajo”. El actual capítulo busca contar con los fundamentos teóricos para evaluar el consumo de coque, determinar la cantidad adecuada de alimentación de este portador energético al horno de cubilote, realizar mediciones de temperaturas que permitan realizar cálculos energéticos y simular la mejora a través de un software que ayude a manejar los parámetros operacionales y así alcanzar la determinación de una propuesta que logre la máxima eficiencia posible en el horno de cubilote para fundición de hierro en la empresa Centro Mecanizado Pérez, en la ciudad de Ambato, partiendo de datos científicos probados de la misma índole y contribuir a la disminución de gastos innecesarios en lo que se refiere al consumo del coque, a cumplir con las políticas de estado tanto en el ámbito energético como social y ambiental.

#### **1.2. Caracterización del objeto**

El objeto de investigación de este proyecto es el horno de cubilote para la fundición de hierro y está ubicado en la ciudad de Ambato, en la empresa Centro Mecanizado Pérez de propiedad del Ing. Patricio Pérez. La Empresa tuvo sus inicios por los años 70 y perteneció a una compañía de 4 hermanos vanguardistas, siendo los pioneros en el centro del país, de dotar a la comunidad de materiales que para la época eran muy apetecidos y que aún siguen siendo, aunque los requerimientos hayan cambiado notablemente. Y por tanto, su propietario busca estar a la par con la tecnología y mantener su competitividad. Es por ello que se requiere realizar cambios que permitan mejorar ciertos aspectos que están causando problemas tanto al interior de la empresa, al no contar con una producción limpia (pérdidas térmicas, polución y contaminación ambiental) sin desmerecer el producto actual, los requerimientos de la industria metal mecánica han alcanzado niveles exigentes, esto es un problema externo al no



contar con los requerimiento que exige la modernización y cumplir con los estándares actuales del ministerio de industrias y productividad del Ecuador.

### **1.2.1. Descripción del objeto**

El horno de cubilote para la fundición de hierro gris es de forma tipo tubular con un diámetro de 60 cm y una altura de 4 m, revestido por ladrillo refractario, su producción es tipo intermitente con una duración de 8 h, de las cuales, 4 son de precalentamiento del horno y las cuatro restantes son de fundición intermitente con al menos 6 paradas cuya capacidad de procesamiento al día es de 2500 kg de chatarra /375.89 kg de coque/ 147.87 kg de caliza y la utilización adicional de 300 kg de coque como cama que básicamente constituye el crisol, el aire ingresa a la zona de combustión a través de un ventilador movido por un motor de 10 HP

### **1.2.2. Delimitación espacio -temporal**

Diagnóstico de la eficiencia energética en el proceso de fundición de hierro, con horno de cubilote, en la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato. Diseño de un recuperador de la energía desperdiciada.

## **1.3. Marco teórico de la investigación**

### **1.3.1. Antecedentes de la investigación**

**Según** (Ramos, Abel, & Guerra Reyes, 2007, pág. 7). **A pesar de que la primera patente de lo que se considera el cubilote moderno cumplió en 1994 doscientos años de ser otorgada a John Wilkinson (Inglaterra), se puede decir que el cubilote mantiene su diseño fundamental hasta estos días. Naturalmente, ha sufrido variaciones estructurales, se le han incorporado aditamentos, se han rediseñado algunas de sus partes, particularmente el sistema de toberas, pero su concepción inicial de horno tubular, en posición vertical, con la entrada de la carga metálica por la parte superior y un contacto directo entre el combustible sólido y dicha carga metálica, se ha mantenido inalterable. Esto se debe a una causa fundamental: el cubilote posee una eficiencia de fusión alta en comparación con los demás hornos empleados con el mismo fin.**

Esto pone de manifiesto que la fundición de hierro por el horno de cubilote tiene una eficiencia buena, pero está sujeta a muchas variables que disminuyen en forma drástica la misma.

**Al respecto (Ramos, Abel, & Guerra Reyes, 2007, pág. 21) indica que en ningún momento se debe olvidar que desde el punto de vista ambiental, el horno de cubilote es un emisor de gases nocivos. De ahí la importancia de conocer adecuadamente la composición de los gases de escape del horno. Se considera que un horno de cubilote opera correctamente, como proceso de combustión, cuando la composición de los gases de escape, medidos en la puerta de carga del horno, es aproximadamente la siguiente: CO<sub>2</sub> 15% y CO 9%. Lo anterior, sin embargo, debe considerarse como valores teóricos, ya que en la práctica pueden variar dichos contenidos en límites más amplios.**

Este aspecto en la tecnología moderna no es la más adecuada y obliga a buscar fuentes energéticas eficientes y nobles con el medio ambiente en un grado permisible, pues no se puede esperar que ninguna de las tecnologías utilizadas sea amigables con el medio ambiente en un ciento por ciento.

**En otras investigaciones como la de (Zhou, J.; Foucher, F.; Persis, S. & Pillier, L., 2011) El aire enriquecido con oxígeno es una de las técnicas más prometedoras para incrementar la eficiencia de los procesos de combustión y de transferencia de calor. Entre las ventajas de utilizar aire enriquecido con oxígeno se encuentran los ahorros de combustible de hasta el 15%, las reducciones en las emisiones de CO<sub>2</sub> de hasta el 25% y los incrementos en la eficiencia energética de hasta el 20%**

Así también (Cacua, K.; Amell, A. y Cadavid, F, 2012, vol. 45) explican que una forma de aumentar la eficiencia energética en el proceso de combustión consiste en aumentar la concentración del oxígeno en el aire hasta lograr niveles cercanos al 100% y además produce ventajas significativas ambientales, y aunque ya se ha utilizado en países como Estados Unidos, Japón y china en las fundiciones de acero con porcentajes de aproximadamente un 24% de oxígeno, se ha obtenido ahorros energéticos sorprendentes. Esta tecnología está

descartada en Ecuador ya que la producción del oxígeno requiere de altos costos, pero uno de los limitantes para la utilización de este tipo de tecnología es la producción del oxígeno a partir del aire.

**Según (Golón, 2009) En el trabajo Diseño de un recuperador de calor para el horno tipo cubilote del taller de fundición, J.A. Ramírez, utiliza un ventilador de tiro forzado con paletas rectas con capacidad de entregar 200 metros cúbicos por minuto y otro ventilador de tiro inducido con paletas rectas que esta acoplado a la tubería que lleva los gases de escape del recuperador de calor a la chimenea, el trabajo de este ventilador es hacer que los gases de escape pasen por los dos pasos de tubería del recuperador de calor hasta la salida al ambiente.**

Existe un beneficio por el aumento de la eficiencia del horno de cubilote con una disminución apreciable del consumo de coque, por la incorporación del recuperador, mejor producción del hierro. Es este tipo de instalación la que requiere la Empresa Centro Mecanizado Pérez, por ser sencilla, sobre todo la de una sola etapa.

**Según (Aristizábal Sierra, 2006) Los primeros se construyen a partir de información experimental y relacionan las variables respuesta más importantes como producción, temperatura y composición química del metal en piquera, con los parámetros de operación como caudal del soplo, porcentaje de enriquecimiento con oxígeno, relación coque-metal, entre otros, mediante herramientas de regresión estadística. Y el segundo 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.**

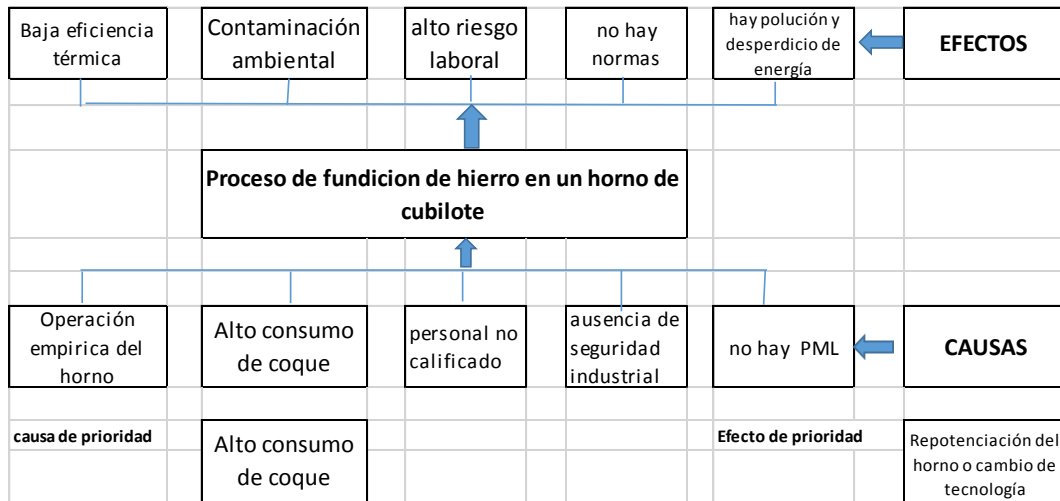
(Aristizábal R. , 2006), **presenta un modelo matemático que describe los fenómenos de combustión en un horno de cubilote. la construcción del modelo se realizó con base en las reacciones heterogéneas coque-gas más importantes; es decir, la reacción de combustión, la gasificación por CO<sub>2</sub> y la gasificación por vapor de**

**agua. Se usó el programa Matlab versión 5.3 y los resultados de la simulación se compararon con los datos experimentales obtenidos en el horno de cubilote de la planta ecoeficiente de la Universidad de Antioquia. El modelo proporciona los perfiles de composición de los gases en la columna del horno, la composición de los gases en chimenea y la velocidad de carga del metal durante la operación. Las desviaciones máximas obtenidas con el modelo fueron menores de 1% para CO<sub>2</sub>, 5% para CO, 7% para la relación de combustión y 9% para la velocidad de carga del metal.**

Esta investigación sirve de base para la determinación promedia de la composición de los gases de salida del cubilote.

#### **1.4. Fundamentación de la investigación**

La familia que ha incursionado es este tipo de actividad, en forma artesanal ha comenzado su proyecto por los años 70 con sistemas de fundición con coque, con una inversión considerable y tratando de cumplir con los estándares de calidad que exigía la reglamentación vigente de aquellos días. Sin embargo, la modernización y los avances tecnológicos en esta actividad traen consigo la implementación de mejoras energéticas como el recuperador de calor del horno actual o el uso de la energía eléctrica (en hornos de inducción) que si bien aumentarán la inversión en la empresa “Centro Mecanizado Pérez”, pueden reducir considerablemente los costos operacionales de la misma e igualar estándares de calidad de las piezas fundidas importadas y sobre todo lograr disminuir la contaminación y pérdidas caloríficas. Ya que de seguir con la operación de este horno de la forma actual se está restringiendo la eficiencia térmica del mismo, que conlleva a varios problemas como es la contaminación ambiental la polución y el deterioro de la salud de los operadores y riesgos laborales. En la figura 1, se muestra el árbol de causas y efectos de la investigación.



**Figura N° 1. 1.** Árbol de problemas con las causas y efectos que intervienen en la investigación  
**Fuente:** Autor

El desarrollo constante de la tecnología, hace que La empresa Centro Mecanizado Pérez busque la tecnología para no solo fundamentarse en el empirismo del conocimiento transmitido por sus antecesores y transformar su empresa, Su propietario consiente de los requerimientos, cada vez más rigurosos de la sociedad, y el avance tecnológico que se ha vendido dando a todo nivel, tanto al interior de sus puertas mejorando las condiciones de trabajo para sus obreros brindándoles seguridad industrial y en lo exterior encontrando tecnologías que sean amigables con el medio ambiente, dando a los clientes materiales de mejor calidad y sin demoras, es decir trabajar con producción más limpia.

En el desarrollo de este trabajo de investigación se analizara el sistema de fundición de material ferroso con una repotenciación del horno de cubilote para que su proceso sea más eficiente desde el punto de vista energético especialmente se evaluara el consumo de este portador energético como es el coque y sus pérdidas caloríficas, sobre todo en la chimenea y un análisis cualitativo de la contaminación.

La determinación de las variables dependiente e independiente es el resultado directo del árbol de problemas, es decir de las causas y efectos. Así la causa primordial que lleva a cabo la investigación es el consumo de coque en el funcionamiento técnico del horno de cubilote, debido a un manejo no adecuado de los parámetros operacionales del horno de cubilote y

como consecuencia de este gasto la disminución de la eficiencia térmica. Por tanto, se tiene como variables del proyecto:

**Tabla N° 1. 1. Matriz causa - efecto**

Causa	Variable independiente	Parámetros operacionales del horno de fundición de hierro al consumo de coque en el horno de cubilote.
Efecto	Variable dependiente	Eficiencia térmica

### **1.5. Operacionalización de las variables**

En esta sección se realiza la operacionalización de las variables involucradas en el proyecto, esta tabla cuenta con al menos 6 columnas y tantas filas como se requiera.

**Tabla N° 1. 2.** Operacionalización de la variable independiente de la investigación

<b>Variable independiente</b>						
<b>Concepto</b>	<b>Categoría</b>	<b>Indicador</b>	<b>ítems</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Instrumentos</b>	<b>Equipos</b>
<p>El horno de cubilote para fundición de hierro gris es una unidad que usa como combustible el coque y como comburente el aire atmosférico a presión, el cual ingresa a las toberas, ubicadas en la parte media del cilindro vertical recubierto en su interior con material refractario.</p> <p>Al mismo tiempo, por la parte superior del horno se introducen los materiales de carga sólidos, entre los cuales se encuentran: el coque, el metal de carga y los fundentes.</p>	Horno de cubilote	Área usada Longitudes	m <sup>2</sup> m	Medición Medición	Guía de observación	Flexómetro flexómetro
	Ventilador	Área de la tubería, ΔP, T	m <sup>2</sup> atm °C	Medición	Guía de observación Relieves termográficos	Flexómetro, Anemómetro de molinete Cámara térmica termómetro
	Temperatura	En la zona de fusión	°C	Medición	Tabla de mediciones	Termocupla
	Materias primas (hierro, coque y caliza)	Cantidades a fundir	Kg	Medición	Guía de observación	Balanza
	Gases de chimenea	Contaminación ambiental Temperatura	m <sup>3</sup> /s °C	Medición	Tabla de mediciones	Tablas de operación sugeridas termográfica

**Tabla N° 1. 3.** Operacionalización de la variable dependiente de la investigación

<b>Variable dependiente</b>						
<b>Concepto</b>	<b>Categoría</b>	<b>Indicador</b>	<b>ítems</b>	<b>Técnicas</b>	<b>Instrumentos</b>	<b>Equipo</b>
“Eficiencia Energética se refiere a la implementación de cambios, mejoras, modificaciones, etc. En los procesos, actividades u operaciones, que lleven consigo la intención de propiciar ahorro energético o una mayor eficiencia” (FERNÁNDEZ RIVERA, C. A. , 2009)	Aire	Flujo volumétrico	m <sup>3</sup> /s	Medición	Guía de observación	Cálculo
	Coque	Consumo	Kg/s	Medición	Guía de observación	Balanza
	Mantenimiento	tiempo	hora	Observación	Guía de observación	Cuestionario y entrevista
	Calor	Pérdidas por transferencia de calor	kJ	Cálculo	Ecuaciones	Cálculo
	Salida de gases de chimenea	Contaminación ambiental	Kg CO <sub>2</sub> eq °C	Medición	Ecuaciones Relieves termográficos	Cálculo  Termocupla



## **1.6. Fundamentación Legal**

La CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008 Norma, varios artículos que se consideran en la presente investigación con el afán de circunscribirse a los mandatos que dictan las leyes ecuatorianas como las que siguen:

### **1.6.1. Sección segunda. Ambiente sano**

**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.

### **1.6.2. 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.

Dichos artículos concuerdan con el Ministerio del Medio Ambiente, bajo su estructura organizacional, en la Dirección Nacional de Control y Prevención de la Contaminación se encuentra como una de sus funciones la gestión de la producción más limpia, respaldándose y fundamentándose en los principios

emitidos en la Cumbre de Río 1992 para la consecución del desarrollo sostenible. (Alfateclimin, 2007)

**Económica:** Las Empresas metal mecánica cada vez se están desarrollando, y por tanto, requieren de materiales de mejores características que cumplan con estándares que exige el ministerio de la industria y productividad. Para mantenerse en el mercado, necesitan cumplir muchas condiciones como precios accesibles, calidad de producto, entrega oportuna, así como en lo interno mantener seguridad industrial y producción cada vez más limpia. Todo esto conlleva a un mejoramiento obligatorio de los procesos de producción, esto es concebir la modernización, que finalmente logra un aumento en la eficiencia. Sin ser el propósito fundamental de este trabajo de investigación, contribuirá a disminuir los gastos que por falta de eficiencia se dan en el proceso de fundición de hierro.

**Social:** Al mejorar los parámetros operacionales en la combustión del coque en los hornos de cubilote para la producción de hierro colado de cualquier empresa fundidora se logrará disminuir la contaminación, conservar los recursos, se contribuye al bienestar de la población, lo cual constituye un gran aporte social.

**Medioambiental:** Al disminuir las pérdidas por transferencia de calor en el horno de cubilote se mejorará la eficiencia del horno, se disminuye el consumo de coque, combustible no renovables y de alta contaminación ambiental, por tanto este trabajo contribuye a la disminución de emanaciones dañinas para el medioambiente.

### **1.7. Antecedentes de estudio**

En la tesis (Golón, 2009) emplea el método inductivo, para Diseñar un recuperador de calor para un horno tipo cubilote, aprovechando los gases de escape del horno y con ello aumentar la eficiencia y al mismo tiempo disminuir el consumo de combustible.

En el trabajo de los docentes de Ingeniería de materiales 2005 desarrollan un modelo matemático para evaluar los fenómenos de combustión **en un horno de cubilote**. Luego de utilizar el método práctico de campo, presentan un modelo matemático que describe el fenómeno de combustión que ocurre en zonas delimitadas del horno de cubilote. Se usó el programa Matlab versión 5.3 y los resultados de la simulación se compararon con los datos experimentales obtenidos en el horno de cubilote de la planta ecoeficiente de la Universidad de Antioquia. El modelo proporciona los perfiles de composición de los gases en la columna del horno, la composición de los gases en chimenea y la velocidad de carga del metal durante la operación. Las desviaciones máximas obtenidas con el modelo fueron menores de 1% para CO<sub>2</sub>, 5% para CO, 7% para la relación de combustión y 9% para la velocidad de carga del metal.

En el estudio “**Revisión de la combustión con aire enriquecido con oxígeno como estrategia para incrementar la eficiencia energética**”, (Cacua, K.; Amell, A. y Cadavid, F, 2012, vol. 45) analiza la fenomenología del proceso de combustión con aire enriquecido con oxígeno haciendo énfasis en los aspectos termodinámicos, químicos y cinéticos, así como formas de obtener aire enriquecido con oxígeno utilizados en la actualidad.

### **1.8. Fundamentación teórica.**

El horno de cubilote, ha sido foco de estudio en investigaciones de aprovechamiento de energía, así (Golón, 2009), habla de los cubilotes con insuflación de aire caliente, hace un recuento de los dispositivos o sistemas de recuperación de calor, patentados como sistemas tipo Griffin, de igual manera la firma alemana Gesellschaft fur Huttenwerksanlagen m. b. H. diseño otro recuperador aunque más complejo los dos tienen la misma principio. Utilizar el calor de los gases de salida para que caliente el aire que finalmente ingresa a la tobera. El presente trabajo consiste en aumentar la eficiencia de la fundición de hierro en el horno de cubilote, al cual utiliza como materia prima la chatarra ferrosa.

El horno de cubilote es un equipo que mal operado reduce drásticamente su eficiencia, lo cual provoca un exceso en el consumo de coque utilizado en el proceso. Existe ciertas condiciones donde los parámetros operadores que se utiliza para trabajar el horno de cubilote, permitirá alcanzar el máximo de eficiencia.

Por tanto se pretende identificar estas condiciones de operación del horno, donde la alimentación de coque-hierro-caliza de la máxima eficiencia, para ello se sugiere cambios en la estructura misma del horno, enriquecimiento de oxígeno en el aire que ingrese por las toberas o un cambio global de tecnología como puede ser la de inducción.

Es necesario por tanto conocer los diferentes hornos de fundición de hierro, así como la manera de mejorar dichos procesos.

### **1.8.1. Proceso de fundición**

La fundición de hierro a partir de chatarra-coque- caliza se realiza en una unidad que aprovecha el calor de combustión del coque, cuando este se halla de manera incandescente y se pone en contacto con el oxígeno del aire que ingresa por las toberas, es un proceso que permite la combustión del coque.

### **1.8.2. Características de los hornos**

Horno es un dispositivo que permite generar calor y mantenerlo dentro de un cierto compartimiento”. Existen diferentes tipos de hornos utilizados en las industrias: los de cubilote (más usados en la industria de materiales ferrosos), los tipo reverberó, los eléctricos y los de inducción.

Además los hornos, sobre todo los industriales, pueden funcionar con diferentes tipos de energías, como los combustibles fósiles tales como coque, gas natural, bunker, existen los que utilizan energía eléctrica, así como los de inducción que usa corriente alterna a través de una bobina que genera un campo magnético en el metal, causando un rápido calentamiento y la fusión posterior del metal; o el que usa electrodos.

### 1.8.3. Horno de cubilote

Uno de los hornos más versátiles y de tecnología probada es el de cubilote, unidad cilíndrica de fusión más utilizada en el último siglo para la fabricación de hierro fundido, y el portador energético preferentemente usado es el coque. Cuyo poder calorífico va en función de la coquización a la que es sometido la hulla o el carbón mineral.

El horno de cubilote utilizado en la empresa Centro Mecanizado Pérez tiene una versión muy simple, su cilindro está recubierto internamente por ladrillo refractario. En la parte inferior esta una cámara de aire que contiene unas 4 toberas por donde ingresa el aire a la zona donde se efectúa la combustión, proporcionando el hierro gris.

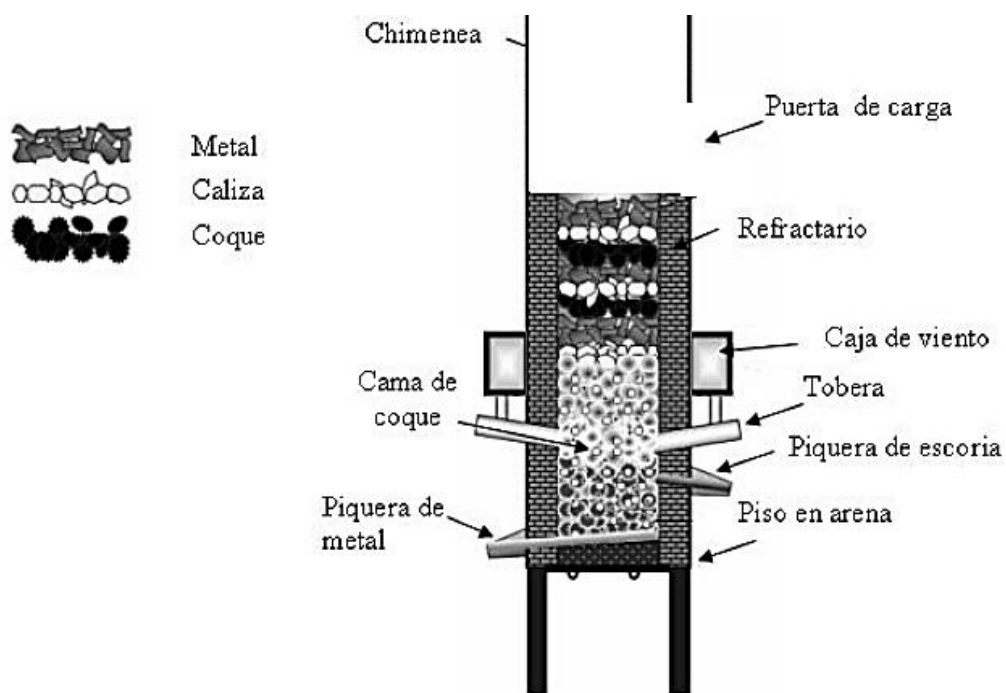


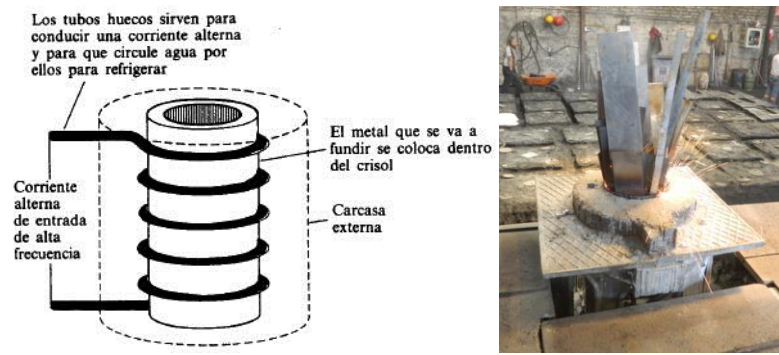
Figura N° 1. 2. Esquema del horno de cubilote

Fuente: (Aristizábal Sierra, 2005)

### 1.8.4. Horno de inducción

Son equipos eléctricos con unidades de alta potencia y frecuencia. Utilizan corriente inducida para fundir la carga, que es entregada por una unidad de potencia o inversor que inyecta corriente de frecuencia alterna y variable a una

bobina, la cual contiene una sección de cobre reforzado y alta conductividad maquinada en forma helicoidal; la corriente que pasa por la bobina forma un campo electromagnético. La fuerza y magnitud de este campo varía en función de la potencia y corriente que pasa a través de la bobina y su número de espiras. Proporciona el hierro nodular de mejores características que el hierro gris, pues alcanza mayores temperaturas.



**Figura N° 1. 3.** (a) Componentes básicos de un horno de inducción; (b) horno de inducción en funcionamiento

En general se puede mencionar los siguientes tipos de hornos:

**Tabla N° 1. 4.** Tipos de hornos

<b>Tipo</b>	<b>Material fundido</b>	<b>Combustible</b>	<b>Tamaño</b>
Cubilote	Ferrosos	Coque, diésel, gas natural	Gran altura y poca longitud
Eléctrico de arco	Ferrosos y no ferrosos	Energía eléctrica	Poca altura y gran longitud
Eléctrico de inducción	Ferrosos y no ferrosos	Energía eléctrica	Poca altura y poca longitud
Reverbero	Ferrosos y no ferrosos	Coque, diésel, gas natural	Poca altura y gran longitud

### 1.8.5. Energía

Energía es un término que más o menos, la mayoría tiene una idea de su representación, y podría decirse que es la causante de cambios y transformaciones

a todo nivel, pero a pesar de ello su valor es constante en el universo ya que se transfiere, según el primer principio de la termodinámica.

Debido a que la energía es un requerimiento básica, dentro de la industria, el hombre la emplea en múltiples aplicaciones, pero la importancia de ello es usarla optimizándola al máximo para cerrar la brecha existente entre la oferta y la demanda de este suministro en la actualidad, que oscila en aproximadamente un 11.35%, disminuir tal brecha será el requerimiento de todas y cada una de las empresas para contribuir a mejorar la demanda de los gastos globales y a la larga sería una de las posibles formas de solucionar el problema de la demanda energética no entregada, o sino la otra opción será aumentar la capacidad de generación, según (Kulkarni, 2013).

#### **1.8.6. Energía térmica**

Llamada también calorífica, es una parte constitutiva de la energía interna de cualquier sistema termodinámico que se halla en equilibrio y que es susceptible a cambios debido a la transferencia de calor, que es, un fenómeno que se da por diferencias de temperaturas, éste incremento o disminución de energía térmica encierra varios mecanismos como son el de conducción, convección y radiación.

Según (Incropera, 1999) la transferencia de energía en sólidos involucra a la migración de los electrones libres y a las ondas vibraciones de la estructura cristalina y cada uno aporta al total de la conductividad térmica, es decir hay un componente electrónico y otro debido a la estructura cristalina, y por tanto en los estados líquido y gaseoso la transferencia decaerá debido sus grandes espacios moleculares y su mayor aleatoriedad

#### **1.8.7. Transferencia de calor**

(Rolle, 2006) En su libro menciona que técnicamente la definición de calor se ha manejado siempre apegado a la forma de definición del trabajo y la define como la energía en transición a través de la frontera de un sistema, que no se puede identificar con una fuerza mecánica que actúa a lo largo de una distancia.

### 1.8.8. Transferencia de calor por conducción

(Panama, 2015), indica que en sólidos opacos, la conducción se produce por la existencia de una gradiente de temperatura. El calor se trasmite de la región de mayor temperatura a la de menor temperatura, debido al movimiento cinético o el impacto directo de las moléculas como en el caso de los fluidos en reposo o por el arrastre de los electrones como sucede en los metales.

La ley básica de la conducción del calor (Joseph Fourier), establece: “La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección”.

$$Q_x = -K \cdot A \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \left[ \frac{BTu}{h} ; W \right] \quad (1.1)$$

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -K \cdot \frac{\partial T}{\partial x} \quad \left[ \frac{BTu}{h \cdot pie^2} ; \frac{w}{m^2} \right]$$

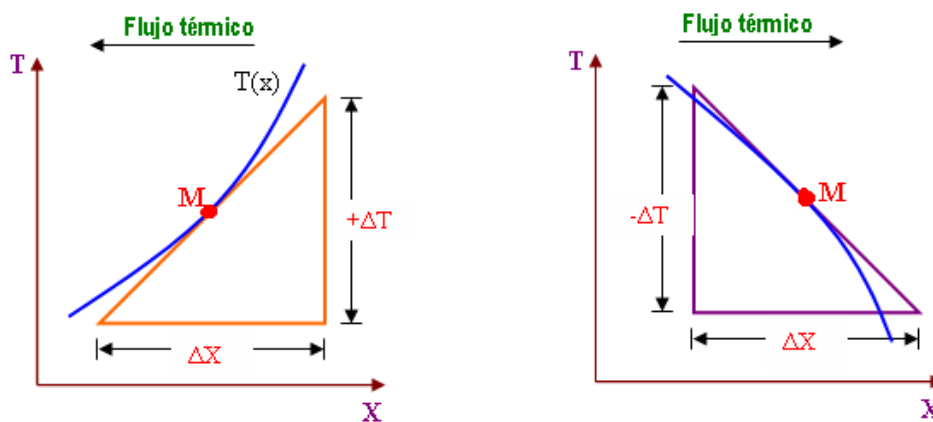
Donde:

$Q_x$  = Tasa de flujo de calor a través del área A en la dirección positiva.

$k$  = Conductividad térmica,  $\left[ \frac{BTu}{h \cdot pie \cdot ^\circ R} ; \frac{w}{m \cdot ^\circ K} \right]$

A = área de sección transversal de la transferencia de calor.

$\frac{\partial T}{\partial x}$  = gradiente de temperatura.



**Figura N° 1. 4.** Signos para la transformación de calor por conducción

**Fuente:** Ing. Alberto Emilio Panama Giro.



### 1.8.9. Transferencia de calor por convección

Según (Panama, 2015) indica que la convección libre se da por la diferencia de densidades en el fluido, como una consecuencia del contacto de una superficie a diferente temperatura. En la figura se muestra el perfil del fluido con relación a su velocidad y temperatura, sin el requerimiento de una fuerza motriz exterior, no es así, el caso de la convección forzada en donde se requiere de esta fuerza motriz externa que mueva al fluido con una velocidad sobre la superficie de temperatura diferente a la del fluido. En ambos casos el calor transferido sigue la ley de enfriamiento de Newton.

$$Q_c = h \cdot A \cdot (T_s - T_f) \quad (1.2)$$

Donde:  $h =$  Coeficiente de transferencia del calor por convección en la

Interface liquido – solido  $\left[ \frac{w}{m^2 \cdot ^\circ K} \right]$

$A =$  Área superficial en contacto con el fluido  $[m^2]$

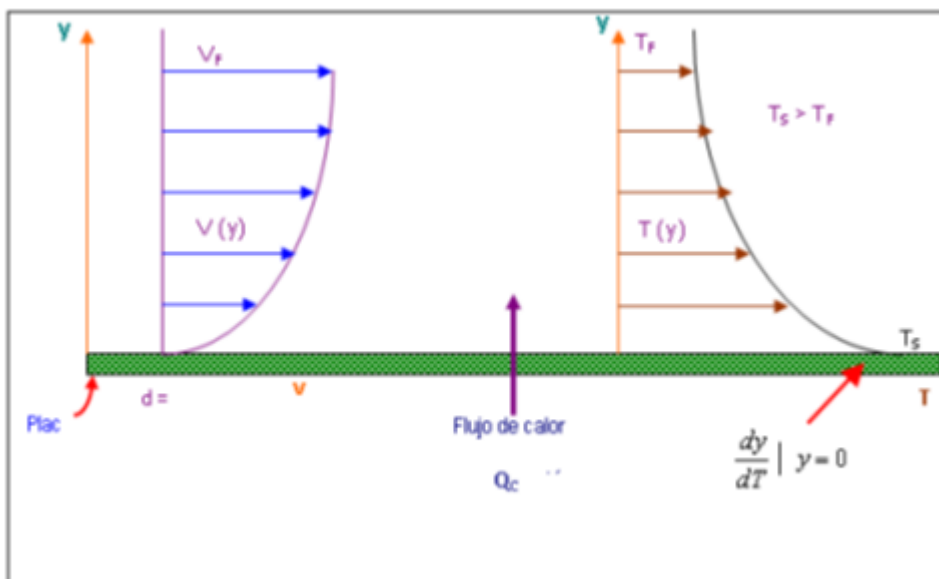


Figura N° 1. 5. Variación de la temperatura y velocidad de un fluido sobre una placa plana en convección forzado

Fuente: Ing. Alberto Emilio Panama Girio.

### 1.8.10. Transferencia de calor por radiación

(Panama, 2015), indica que este tipo de transferencia se puede dar tanto a través de un medio como en ausencia de este (vacío), dicha transferencia se realiza en forma de ondas electromagnéticas o fotones como cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas, y se propagan a la velocidad de la luz.

El calor radiante eliminado por un cuerpo depende de la superficie del cuerpo y de la temperatura absoluta de la misma, un radiador perfecto es considerado el cuerpo negro, cuya energía radiante es calculada según:

$$Q_r = \sigma \cdot A \cdot T^4 = A \cdot E_b \quad (1.3)$$

$\sigma$  = Constante dimensional de Stefan –Boltzmann  $5,67 \times 10^{-8} \left[ \frac{w}{^\circ K^4 \cdot m^2} \right]$

$E_b$  = Poder emisivo del radiador  $0,1714 \times 10^{-8} \left[ \frac{BTu}{h \cdot pie^2 \cdot ^\circ R^2} \right]$

La energía radiante neta se evaluará a partir de la gradiente de temperatura de la superficie entre los cuales tiene lugar el intercambio. Así:

$$Q_r = \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.4)$$

Donde:

$T_1, T_2$  Temperatura del cuerpo negro y la temperatura superficial del recinto [ $^\circ K$ ]

Un cuerpo gris emite radiación según la expresión:

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot T^4 \quad (1.5)$$

Para un cuerpo gris a una temperatura  $T_1$  la energía neta radiante transferida a un cuerpo negro que lo rodea a la temperatura  $T_2$  es:

$$Q_r = \varepsilon \cdot \sigma \cdot A \cdot (T_1^4 - T_2^4) \quad (1.6)$$

$\epsilon$  = Emisividad, valores entre 0 y 1 y constituye una medida para evaluar cuan efectivamente emite radiación un cuerpo real con respecto a uno negro.

### 1.8.11. Combustible y combustión

Materiales susceptibles a quemarse y proporcionar energía calorífica son llamados combustibles, los más usados son los combustibles fósiles, así como el carbón, los hidrocarburos entre este el gas natural, la gasolina, diésel, bunker.

La combustión químicamente hablando no es más que una oxidación del combustible por parte del comburente (oxígeno presente en el aire) y mientras más concentrado se halle el oxígeno en el aire mejor será la combustión.

La cantidad de energía que se libera en la combustión depende del tipo de combustible y es lo que se conoce como **poder calorífico**. En esta investigación, el uso del coque como portador energético mayoritario en los hornos de cubilote es el más utilizado dentro del Ecuador para la producción de hierro gris.

El coque puede ser definido como un material sólido proveniente de la carbonización a alta temperatura de mezclas de carbones, dando lugar a propiedades físicas y químicas determinadas que permiten considerar al carbón como siderúrgico, y cumplen ciertos porcentajes. Según (Pintado, 1952).

Carbono fijo.....	84 a 89%
Materiales volátiles.....	1 a 2%
Cenizas.....	10 a 14%
Azufre.....	0.5 a 1.5%

Un aumento en el porcentaje de oxígeno a las toberas, así como el aprovechamiento de la energía calorífica desperdiciada junto con la gestión energética, puede mejorar apreciablemente la eficiencia.

a) Crisol

El crisol constituye la parte baja del horno, donde estará ubicada una gran cantidad de coque que servirá de cama para las cargas que vendrán el momento que haya alcanzado su temperatura ideal en el precalentamiento que dura alrededor de cuatro horas.

b) Proceso de fundición en horno de cubilote

El proceso de fundición requiere de varios sitios en los que se realizaran diferentes acciones antes de transformar el hierro (chatarra) en hierro gris, para ello la chatarra junto con el coque, la caliza y el flujo de aire consiguen alcanzar la energía requerida por el metal para fundirlo, y mejor aún, alcanza temperaturas superiores dándole fluidez y cristalografía necesaria para ser moldeado. La empresa cuenta con varias secciones o etapas:

- El área de moldeo está compuesta de dos secciones, la de diseño y construcción de plantillas, y la otra de modelado en arena de las piezas que se fundirán.
- El área de preparación de material se encarga de clasificar la chatarra y darle el tamaño adecuado para que ingrese al horno y junto con el coque y la caliza mientras más pequeñas son las piezas a ser fundidas mejor reaccionaran.
- En la sección de fundición, el portador energético coque funde la chatarra con ayuda del coque, caliza y aire.
- La sección de Metal Mecánica se encarga de dar un acabado a las piezas fundidas, serán pulidas, torneadas, cepilladas.

A continuación se muestra graficas de las diferentes secciones:



**Figura N° 1. 6.** Esquema de las áreas de proceso de fundición

### 1.9. Conclusiones del capítulo

- La investigación relevante que fundamenta éste trabajo es la recuperación del calor por medio del aprovechamiento de gases de chimenea como sugiere (Golón, 2009), Aunque existen otros trabajos con índices sorprendentes de ahorros de combustible, reducción de contaminantes y mejora de eficiencia energética, no son factibles dentro del medio debido a los altos costos de producción que supondría adaptar dichos procedimientos.
- Entre los hornos más usados para la fusión de la chatarra está el de cubilote que proporciona el hierro gris, y el horno de inducción que da un salto grande en la producción de hierro nodular de mejores características.
- El horno de cubilote utiliza como único portador energético el coque, esto hace que su proceso de combustión sea altamente contaminante, por cuya razón es partida de muchas investigaciones, todas ellas con la finalidad de mejorar la eficiencia térmica y disminuir la contaminación.

## CAPÍTULO 2

### PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DE LA EFICIENCIA TÉRMICA DE LA FUNDICIÓN DE HIERRO EN HORNO DE CUBILOTE

#### 2.1. Introducción

El proceso de fundición de hierro en horno de cubilote de la empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato involucra diversos parámetros que deben ser tomados en cuenta para la evaluación de la eficiencia térmica. Para lo cual se desarrolla una serie de cálculos de los diversos procesos que intervienen en la fundición del hierro. Posteriormente se simula el aprovechamiento de un porcentaje los gases de salida, posible mejora, y se determina la eficiencia.

El objetivo del capítulo es conocer los fundamentos teóricos que me permitirán calcular las pérdidas por transferencia de calor en el proceso de fundición actual así como la energía requerida para la fundición del hierro y simular la posible mejora utilizando métodos numéricos mediante el software de ANSYS. En la figura N° 2.1 se presenta al horno objeto de estudio.

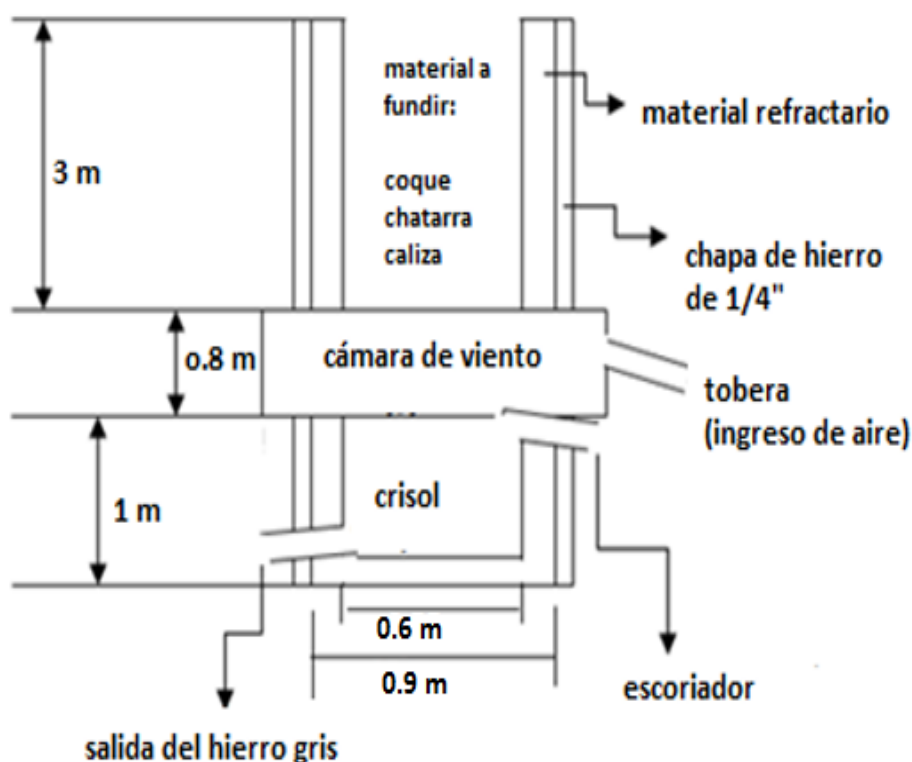


Figura N° 2. 1. Dimensiones del horno de cubilote de la empresa Centro Mecanizado Pérez

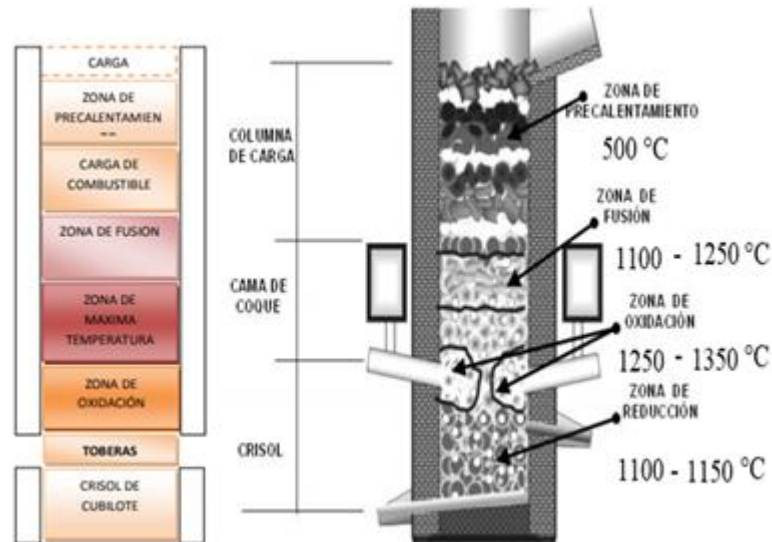
## 2.2. Energía requerida para llevar a cabo la fusión del hierro

La energía necesaria para la fundición de hierro se obtiene de la combustión incandescente del coque con el oxígeno que ingresa por las toberas, los gases calientes ascienden a través de la columna del horno entran en contacto con el material cargado y los funden. El proceso es a contracorriente, pues el material de carga baja mientras los gases calientes suben. Es común que los investigadores de cubilote lo dividen en zonas según los procesos y reacciones que ocurren en él, como se muestra en la figura (Sierra, 2006).

**Tabla N° 2. 1.** Proceso que se produce en cada zona del horno de cubilote con las temperaturas del cubilote de la Empresa Centro Mecanizado Pérez

<b>Zona</b>	<b>Comprende desde:</b>	<b>Proceso que se da en dicha zona</b>
precalentamiento	el tragante hasta la zona de fusión Su temperatura oscila en unos 500 °C	Calentamiento sin reacción de la carga (coque, caliza, hierro,)
Fusión	Temperatura oscila entre 1100 - 1250 °C	El material se funde al llegar a la temperatura de fusión
Oxidación o combustión	Zona de mayor temperatura oscila entre 1250 - 1350 °C	Contacto con el flujo de aire, punto donde se da la combustión, lugar que proporciona el calor requerido para el proceso
Reducción o crisol	Temperatura oscila entre 1100 - 1150 °C	Donde se acumula el material fundido, Existe una separación del metal y la escoria, recuperación del carbono en el metal en el contacto con el coque y reacciones de óxido – reducción en la interface metal escoria

Cada una de estas zonas está ilustradas con su correspondiente temperatura, aproximada, a través de la Figura No. 2.2



**Figura N° 2. 2.** Zonas en el horno de cubilote con la temperatura aproximada en el horno de la Empresa Centro Mecanizado Pérez

**Realizado:** (Aristizábal Sierra, 2005)

Existen muchos estudios relacionados con el horno de cubilote en la fundición de hierro, estos están relacionados con la combustión con el coque o con un aporte adicional como de gas o un aumento en el porcentaje de oxígeno en la entrada de aire, así como, estudios teóricos y experimentales de la operación del cubilote, que sin duda han contribuido de manera positiva al entendimiento de los fenómenos de combustión.

El cálculo del calor requerido para la fundición del hierro, desde cualquier punto de vista es complicado pero puede simplificarse si se considera que la conductividad térmica permanece constante en un intervalo de temperatura, el error introducido debido a la superposición resulta ser pequeño en este caso específico.

Se utilizará los calores específicos de los materiales de carga, en sus diferentes estados y los calores latentes requeridos para el cambio de fase, que fueron tomados de las tablas de (Fuller, 1923); El horno de cubilote y sus operaciones



pág. 853, 854 y 859. Esto permite calcular por cada material tres tipos de calores, dos de los cuales son sensibles y uno de cambio de fase, Se utilizará las siguientes ecuaciones:

- a) Para la determinación del flujo de calor sensible al primer cambio de temperatura.

$$Q_{Fe-1} = \frac{m \cdot Cp_{Fe-1} \cdot \Delta T_1}{t_1} \quad (2.1)$$

Donde:

$Q_{Fe-1}$ : Calor requerido para elevar la temperatura del material a la temperatura de fusión, [kW]

$m$ : masa de material a fundir, [kg]

$Cp_{Fe-1}$ : Calor específico del material [ $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$ ]

$\Delta T_1$ : Variación de temperatura entre la atmosférica y la de fusión [ $^\circ C$ ]

$t_1$ : Tiempo, hasta alcanzar la temperatura de fusión [s]

- b) Para la determinación del flujo de calor al cambio de fase.

$$Q_{Fe-2} = \frac{m \cdot h_{Fe-2}}{t_2} \quad (2.2)$$

Donde:

$Q_{Fe-2}$ : Calor requerido para fundir el material a la temperatura de fusión, [kW]

$h_{Fe-f}$ : Calor específico del material [ $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$ ]

$t_2$ : Tiempo requerido para el cambio de fase [s]

- c) Para la determinación del flujo de calor sensible al cambio de temperatura.

$$Q_{Fe-3} = \frac{m \cdot Cp_{Fe-3} \cdot \Delta T_2}{t_3} \quad (2.3)$$

$Q_{Fe-3}$ : Calor requerido para elevar la temperatura del material a la temperatura de la colada, [kW]

$Cp_{Fe-3}$ : Calor específico del material [ $\frac{kJ}{kg \cdot ^\circ K}$ ]

$\Delta T_2$ : Variación de temperatura entre la atmosférica y la de fusión [ $^\circ C$ ]

$t_3$ : Tiempo, hasta alcanzar la temperatura de la colada [s]

Una vez, hallado estos valores se puede calcular el calor requerido para el proceso de fundición del hierro, pues para fundir el metal se requiere alcanzar la temperatura de fusión, y sobrecalentarlo para colarlo, por lo tanto la suma de ellos es el calor total requerido.

$$Q_f = Q_{Fe-1} + Q_{Fe-2} + Q_{Fe-3} \quad (2.4)$$

Siendo:

$Q_f$ : Calor requerido en el proceso de fusión, [kW]

Este valor representa el mínimo calor necesario para la fusión del hierro, ya que existen algunas pérdidas de calor que hace que la cantidad de combustible aumente para compensar las pérdidas.

### 2.3. Calor perdido al ambiente

Considerando que la temperatura interna en la zona de combustión es de 1350  $^\circ C$  a condiciones estables, las pérdidas de calor darán un parámetro de cuanto es la cantidad de combustible requerido para mantener el horno a esa temperatura. Dichas perdidas pueden deberse a tres tipo de transferencias conocidas como conducción, convección y radiación.

Así las pérdidas por conducción se producen a través de las paredes, la chimenea y por el fondo del horno. Por convección se producen en la superficie cilíndrica del horno expuesta al aire circundante del horno y las pérdidas por radiación, se producen en la superficie de alta temperatura con alta emisividad.

### 2.3.1. Las pérdidas de calor por las paredes:

Se muestra un diagrama que muestra la transferencia por conducción de calor en el horno de cubilote, considerando que es un cilindro hueco forrado internamente con ladrillo refractario, el calor generado por la reacción, alcanza una temperatura de alrededor de unos 1350 °C. Asumiendo la transferencia de calor unidireccional en dirección del radio de la pared a una temperatura medida experimentalmente de alrededor de unos 70 °C.

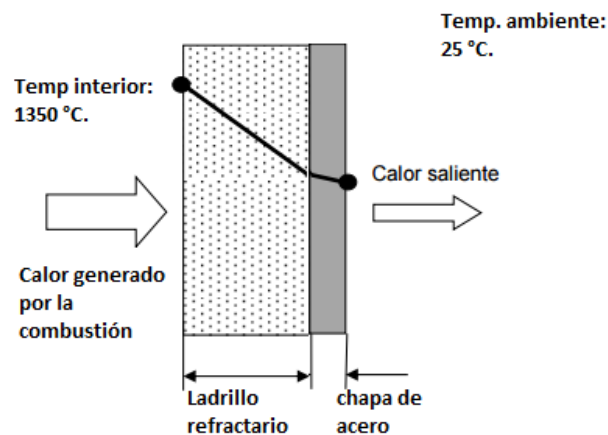


Figura N° 2. 3. Gradiente de temperatura en el horno de cubilote.

### 2.3.2. Resistencia térmica involucrada en el proceso de fundición en el horno de cubilote

La Transferencia de Calor a partir de un cilindro hueco, como se muestra en la figura, está dada por las resistencias siguientes:

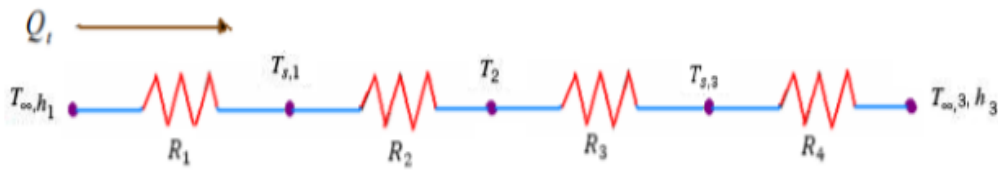


Figura N° 2. 4. Gradiente de resistencia en serie en el horno de cubilote.

En donde las resistencias térmicas  $R_1, R_4$  se deben a la transferencia de convección y  $R_2, R_3$  son debido a la transferencia por conducción. Este diagrama visualiza la transferencia de calor en estado estable, para el caso estacionario las paredes cilíndricas. Pueden ser tratadas como paredes planas de capas múltiples, siendo en este caso las paredes cilíndricas compuestas por la chapa de hierro y la capa de ladrillo refractario y de altura  $L$ , si se considera el Circuito térmico equivalente para una pared compuesta en serie. La velocidad de conducción viene dada por la ecuación siguiente:

$$Q_{conv-cond} = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,3})}{R_{total}} \quad (2.5)$$

Donde:

$Q_{conv-cond}$ : Transferencia de calor por conducción y por convección, [kW]

$T_{\infty,1}; T_{\infty,3}$ : Temperatura del fluido interno y externo respectivamente [ $^{\circ}\text{C}$ ]

$R_{total}$ : Resistencia total, por conducción y convección [ $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ ]

Para el horno de cubilote, que está compuesto por dos capas, la chapa de acero de  $\frac{1}{4}$ " de espesor, y la del ladrillo refractario con un espesor de unos 16.25 cm. aportan resistencias diferentes por tener coeficientes de conducción diferentes y por tanto, cada una aporta con una resistencia térmica por conducción, como muestra las ecuaciones siguientes:

$$R_{cond1} = \frac{Ln \frac{r_2}{r_1}}{2\pi k_A L} \quad (2.6)$$

$$R_{cond2} = \frac{Ln \frac{r_3}{r_2}}{2\pi k_B \cdot L} \quad (2.7)$$

Donde:

$R_{cond1}$ : Resistencia térmica del ladrillo refractario, [°C/W]

$R_{cond2}$ : Resistencia térmica de la chapa de acero, [°C/W]

$r_1$ : Radio interno de la capa de refractario, [m]

$r_2$ : Radio externo de la capa de refractario e interno de la chapa de acero, [m]

$r_3$ : Radio externo de la chapa de acero, [m]

$k_A$ : Coeficiente de conductividad térmica del ladrillo refractario U32, [1,2  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]

$k_B$ : Coeficiente de conductividad térmica de la chapa de acero A36, [43  $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]

Para el caso de la transferencia de calor por convección, que es lo que se produce dentro del horno y fuera de él, con diferencia de sus coeficientes de convección y temperaturas se tiene las siguientes expresiones:

$$R_{conv 1} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1} \quad (2.8)$$

$$R_{conv 2} = \frac{1}{h_3 \cdot A_3} \quad (2.9)$$

Donde:

$R_{conv 1}$ : Resistencia térmica por convección del fluido interno, [°C/W]

$R_{conv 2}$ : Resistencia térmica por convección del fluido externo, [°C/W]

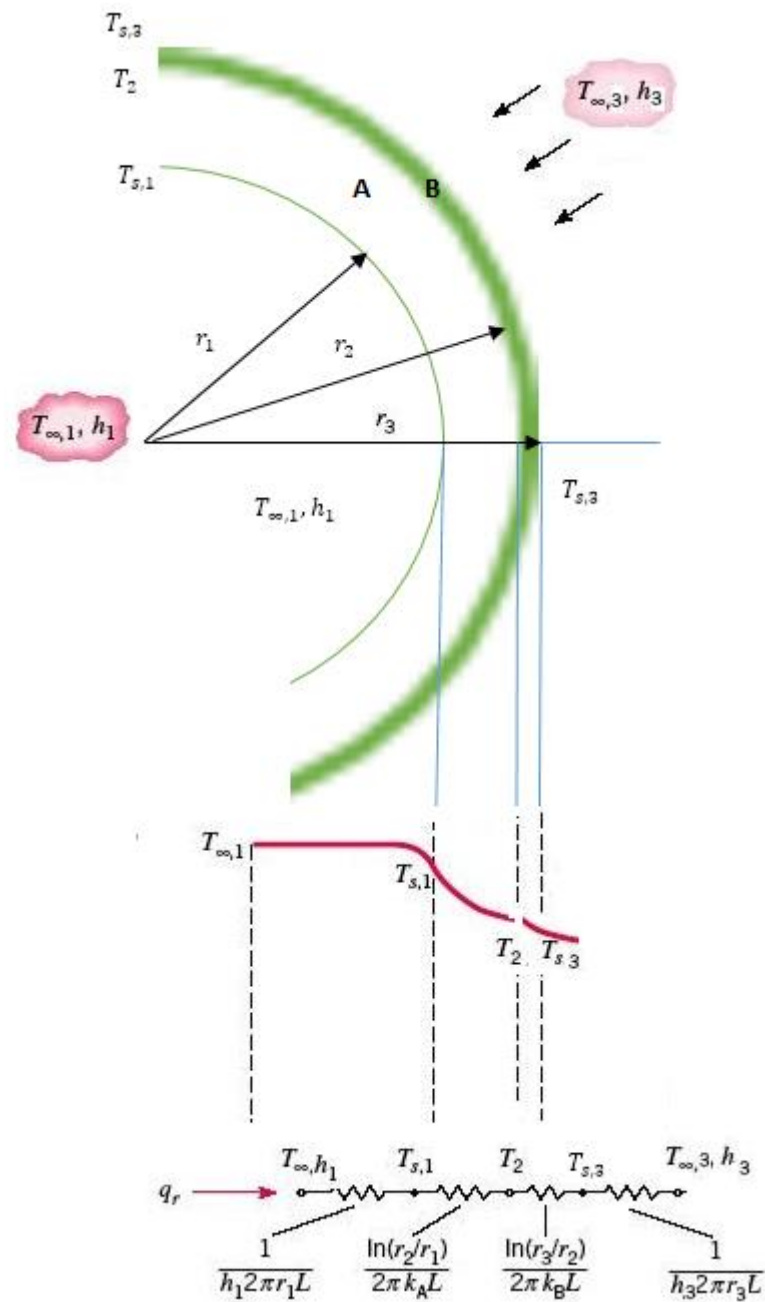
$h_1$ : Coeficiente de transferencia de calor convectivo interno. [W/m<sup>2</sup>]

$A_1$ : Área superficial de la pared interna del cilindro, [m<sup>2</sup>]

$h_3$ : Coeficiente de transferencia de calor convectivo del aire a la temperatura ambiente en un lugar cerrado, [W/m<sup>2</sup>]

$A_3$  Área superficial de la pared externa del horno de cubilote, [m<sup>2</sup>]

La representación gráfica del sistema de transferencia se observa el diagrama No.2.5. El diagrama muestra una parte de la vista superior del horno de fundición de hierro tipo cubilote, en donde se representa todos los parámetros involucrados en la transmisión de calor, tanto conductivo como convectivo y la representación de las diferentes resistencias a las que está sujeta la transferencia de calor debido a estar compuesto por varias capas, y de esta manera hallar la resistencia térmica global que experimenta el horno de cubilote y con su valor determinar la velocidad de pérdida de calor y su distribución de temperatura.



**Figura N° 2. 5.** Distribución de temperatura y circuito térmico equivalente a través de la pared cilíndrica del horno de cubilote.

### 2.3.3. Cálculo de los coeficientes de transferencia.

Ahora para obtener el efecto de convección se debe conocer el coeficiente de transferencia de calor por convección “h”. En su determinación se han hecho las siguientes consideraciones: la temperatura del fluido interior es un promedio de

las temperaturas de las zonas del horno y la temperatura del exterior, la del ambiente (anexo B). Además se supone que están sujetas a la presión atmosférica.

Las propiedades del fluido se tomaron de (Cengel, 2007) a la temperatura de película, que se la considera el promedio aritmético de las temperaturas de la superficie y del fluido adyacente. Así:

$$T_f = \frac{T_s + T_\infty}{2} \quad (2.10)$$

Donde:

$T_f$ : Temperatura de película, [°C]

$T_s$  Temperatura de superficie, [°C]

$T_\infty$  Temperatura de fluido libre, [°C]

Con la ayuda de las tablas de ciertas propiedades del aire y la temperatura de película se determina los valores de conductividad térmica de conducción, viscosidad, número de Prant, coeficiente de expansión volumétrica; a partir de los cuales se determinara h.

La relación de fuerzas de movimiento entre fuerzas de resistencia o viscosas da el número de Grashof (Gr), que sirve para determinar el coeficiente convectividad en convección libre alrededor de cilindros verticales (Cengel,2007).

$$Gr_L = \frac{g \cdot \beta \cdot (T_s - T_\infty) \cdot L_c^3}{\nu^2} \quad (2.11)$$

$Gr_L$ : número de Grashof.

$g$  : aceleración gravitacional, [m/s<sup>2</sup>]

$\beta$  : coeficiente de expansión volumétrica, [1/°K]

$L_c$  :Longitud característica de la configuración geométrica, [m]

$\nu$  : viscosidad cinemática del fluido, [m<sup>2</sup>/s]



Si cumple con la expresión siguiente, el horno tipo cilindro puede analizarse como una placa plana vertical.

$$D \geq \frac{35 \cdot L_c}{Gr_L^{1/4}} \quad (2.12)$$

Donde:

D: diámetro exterior del horno de cubilote, [m]

Al cumplir con esta condición se analiza como una placa plana vertical, obteniendo en número de Rayleigh, según la ecuación:

$$Ra_L = Gr_L \cdot Pr \quad (2.13)$$

Donde:

$Ra_L$ : número de Rayleigh

Pr : número de Prandtl

Prosiguiendo con la determinación se obtendrá el número de Nusselt, según la expresión siguiente:

$$Nu = \left\{ 0,825 + 0,387 \cdot Ra_L^{1/6} \left[ 1 + \left( \frac{0,492}{Pr} \right)^{9/16} \right]^{8/27} \right\}^2 ; Ra_L > 10^9 \quad (2.14)$$

Donde:

Nu: Número de Nusselt.

Entonces, el coeficiente de transferencia de calor por convección puede determinarse por la expresión:

$$h_3 = \frac{Nu \cdot k}{L} \quad (2.15)$$

Donde:

$h_3$ : Coeficiente de transferencia de calor por convección, [W/m<sup>2</sup>]

k: Conductividad térmica, [ $\frac{W}{m \cdot ^\circ C}$ ]

Para el coeficiente de convección  $h_1$  del fluido interno a una temperatura promedio de 1000°C, aproximadamente, se tienen las propiedades del aire (Cengel, 2007).

Con los valores de  $\mu$ , densidad, Pr, conductividad térmica, se determina el número de Reynolds, Según la ecuación:

$$Re = \frac{4 \cdot \dot{m}_h}{\pi \cdot D_i \cdot \mu} \quad (2.16)$$

Como el número Reynolds es mayor que 2200 el fluido es turbulento, por lo tanto:

$$Nu_D = 0,023 \cdot Re_D^{\frac{4}{5}} \cdot Pr^{0,4} \quad (2.17)$$

Por tanto “h” va a estar dado por la ecuación:

$$h_1 = Nu_D \cdot \frac{k}{D_i} \quad (2.18)$$

### 2.3.4. Cálculo de la resistencia global del sistema

Con los valores obtenidos de los coeficientes de convección se calcula la resistencia global según la ecuación:

$$R_{total} = \frac{1}{h_1 \cdot A_1} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot k_A \cdot L} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot L} + \frac{1}{h_2 \cdot A_2} \quad (2.19)$$

### 2.3.5. Cálculo del calor de conducción y convección.

La transferencia de calor por conducción y convección viene dada según la ecuación:

$$Q_{conv-cond} = \frac{(T_{\infty,1} - T_{\infty,3})}{\frac{1}{h_1 \cdot A_1} + \frac{\ln \frac{r_2}{r_1}}{2 \cdot \pi \cdot k_A \cdot L} + \frac{\ln \frac{r_3}{r_2}}{2 \cdot \pi \cdot k_B \cdot L} + \frac{1}{h_2 \cdot A_2}} \quad (2.20)$$

### 2.3.6. Cálculo de los calores perdidos

#### a) Calores por radiación.

Finalmente, se puede determinar la transferencia de calor por radiación, mediante la ecuación:

$$Q_{rad} = \varepsilon \cdot A_s \cdot \sigma \cdot (T_s^4 - T_{\infty}^4) \quad (2.21)$$

La suma de estos calores obtenidos representa las pérdidas de calor al ambiente por las paredes. Según la ecuación:

$$Q_{cond-conv-rad} = Q_{conv-cond} + Q_{rad} \quad (2.22)$$

### b) Las pérdidas de calor por la chimenea.

La pérdida de calor en los gases de combustión es la principal pérdida de energía en un proceso de este tipo y es imposible de eliminar, porque los productos de este proceso son calentados por el proceso mismo. No obstante, puede ser minimizada reduciendo la cantidad de exceso de aire suministrado al quemador. O bien utilizándolos para calentar el aire que ingresa a las toberas.

La chimenea del horno de cubilote es la que más presenta pérdidas de calor por radiación hacia el exterior. Si se supone que la abertura hacia el ambiente representa un cuerpo negro, el cálculo de transferencia de calor hacia los alrededores, sería:

$$Q_{rad} = \varepsilon A_j F_{i \rightarrow j} \sigma (T_s^4 - T_\infty^4) \quad (2.23)$$

Dónde:

$A_j$ : Área de la abertura, [m<sup>2</sup>]

$F_{i \rightarrow j}$ : Factor de radiación para aberturas.

### c) Pérdidas de calor en la Base del horno

Se analizará la base del horno como una placa plana circular la cual está hecha de sílice con cemento refractario, el área de transferencia es la del círculo de la base del cilindro que forma el horno y cuyo valor será determinado por la ecuación:

$$A = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \quad (2.24)$$

Donde:

D: Diámetro del cilindro, [m<sup>2</sup>]

La resistencia térmica básicamente es debida a la conducción y radiación, el factor convectivo se desprecia debido a que esta contra el piso:

$$R_{base} = \frac{\Delta x}{A \cdot k} \quad (2.25)$$

Por tanto la transferencia de calor está dado por:

$$Q_{base} = \frac{T_1 - T_2}{\frac{\Delta x}{A \cdot k}} \quad (2.26)$$

El calor total perdido por el fondo será la suma algebraica de los dos calores.

### 2.3.7. Calor total perdido

Así las pérdidas totales del horno de cubilote en operación, una vez alcanzada la temperatura son:

$$Q_{total} = Q_{paredes} + Q_{chimenea} + Q_{base} \quad (2.27)$$

### 2.3.8. Pérdidas en los gases de escape

El proceso de fusión del hierro realiza un recorrido en el tubo cilíndrico del horno de cubilote, como ya se dijo el hierro pasará por la cámara de carga seguida de la cama de coque y finalmente la zona de crisol, en cada una de estas zonas, el consumo de coque es evidente, sobre todo en la cama de coque donde se efectúa la fusión y alcanza temperaturas de aproximadamente 1200 - 1350 °C, como lo muestra la Fig. No. 2.2. Para calcular la cantidad de coque que se requiere como combustible único que mantiene la temperatura a condiciones estables de operación.

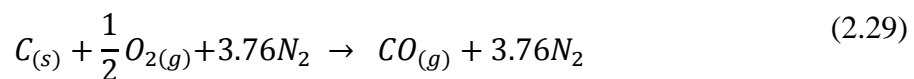
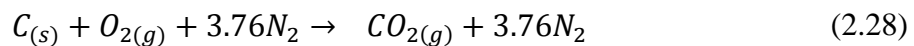
Se necesita conocer las características del coque que se va a utilizar, puesto que en el mercado hay una gran variedad con mayor o menor porcentaje de carbón. Su selección tendrá una repercusión en los gases de combustión.

La Empresa Centro Mecanizado Pérez utiliza el coque de las siguientes características.

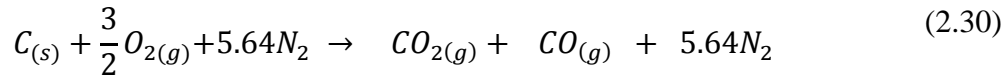
**Tabla N° 2. 2** Características del combustible usado en el horno de cubilote.

<b>FYCO -116 COKE IMPERIAL NACIONAL</b>	
DESCRIPCIÓN	Combustible de alto poder calorífico
APLICACIÓN	para hornos de cubilote recarburizante y aportador de energía (BTU)
PROPIEDADES	Análisis Químico Carbón fijo: 80 – 84 % Cenizas 16 - 18 % Azufre 0.6 – 1 % M. volátil 0.5 – 1 % Humedad 5 - 8 % Poder calorífico: 25 000 BTU X Kg. Tamaño: Todo uno (de 1” a 6” aprox.)
PRESENTACIÓN	Sacos de 30 Kg. O a granel.

Es importante conocer la cantidad de aire al ingreso para lograr una buena combustión, para este caso la Empresa Centro Mecanizado Pérez cuenta con un ventilador con un motor de una potencia de 10 HP, el aire es conducido por un tubo de 300 mm. de diámetro a la cámara de viento. En la cámara se distribuye a 4 toberas que dirigen al viento hacia la zona de oxidación del coque incandescente según las reacciones heterogéneas siguientes estas serán las posibles reacciones:



La ecuación química (2.28) muestra un sistema con combustión total, en cambio la ecuación (2.29) indica un sistema con combustión incompleta. Al sumarlas se obtiene:



Esta nueva ecuación representa un sistema con combustión incompleta y con composiciones 13,08% CO, 13,08% CO<sub>2</sub> y 73,82% N<sub>2</sub> y una relación aire/combustible de 17,15, lo que indica un exceso de aire en la zona de oxidación. Según la figura No. 2.7 que considera la experiencia del American Foundrymen's Society para determinar si el cubilote funciona en la zona de promedios sugerida de aire/combustible.

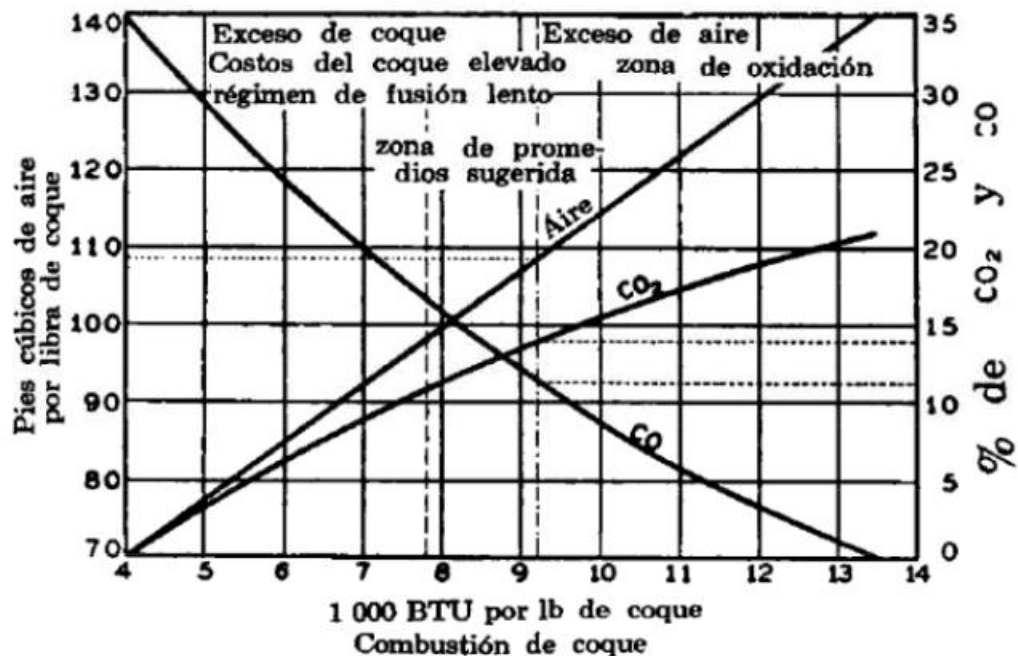
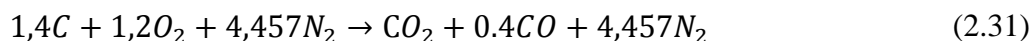


Figura N° 2. 6. American Foundrymen's Society; El horno de cubilote y sus operaciones.

Para asegurar una combustión máxima es conveniente exceder su consumo de aire, al incrementar en un 20%, la reacción será:



Teóricamente la composición de la mezcla resultante sería aproximadamente de 14,58% CO<sub>2</sub>, 5,83 % CO y 64,99% N<sub>2</sub> con una relación aire/combustible de 9,7. Para el estudio de esta investigación se sigue la sugerencia de American Foundrymen's Society, ubicándose en el límite de la zona de promedios

sugeridos y limitando a la zona de exceso de aire, es decir una mezcla de 14% CO<sub>2</sub> , 11% de CO y el resto de los otros gases.

El calor generado por la reacción es utilizado en su mayor parte en el proceso, y ocurre en la zona de oxidación en donde la temperatura alcanza su valor más alto. El calor liberado por mol de coque reaccionado se conoce como entalpia de combustión y puede ser evaluado al considerar que todas las sustancias que intervienen se hallan a condiciones iguales de presión y temperatura y se define como la diferencia entre las entalpias de los productos menos las entalpias de los reactivos multiplicados por sus coeficientes estequiométricos respectivos. Este término también puede ser llamado como poder calorífico del combustible, en este caso se recomienda expresarlo en kJ/ kg de combustible.

$$\Delta H_{reacción}^0 = \sum N_{prod} \cdot \Delta H_{f_{prod}}^0 - \sum N_{react} \cdot \Delta H_{f_{react}}^0 \quad (2.32)$$

Donde:

$\Delta H_{reacción}^0$ : Entalpia de combustión. [kJ/mol]

$N_{prod}$ : Coeficiente estequiométrico de los productos, [mol]

$\Delta H_{f_{prod}}^0$ : Entalpia estándar de formación de los productos, [kJ/mol]

$N_{react}$ : Coeficiente estequiométrico de los reactivos, [mol]

$\Delta H_{f_{react}}^0$ : Entalpia estándar de formación de los reactivos, [kJ/mol]

Nota: las entalpias de las sustancias elementales y puras son nulas.

Para determinar la relación aire-combustible se tiene:

$$r_{\frac{a}{c}} = \frac{m_{aire}}{m_{comb}} \quad (2.33)$$

Donde:

$r_{\frac{a}{c}}$ : Relación aire –combustible, [kg<sub>aire</sub>/kg<sub>comb</sub>]

$m_{aire}$ : Masa de aire, [kg]

$m_{comb}$ : Masa de coque, [kg]

El cálculo de la energía pérdida por los gases de combustión se lo hace según la ecuación:

$$Q_{gases} = m_g \cdot Cp_g \cdot (T_g - T_{ref}) \quad (2.34)$$

Donde:

$Q_{gases}$ : Flujo de calor perdido por gases de combustión [kW]

$m_g$ : Flujo másico de los gases de combustión [kg/s]

$Cp_g$ : Calor específico medio de los gases de combustión [kJ/kg·°C]

$T_g$ : Temperatura de los gases de salida, [°C]

$T_{ref}$ : Temperatura de referencia ambiental, [°C]

Por último se debe determinar la eficiencia térmica del horno de fundición de hierro por cubilote de la Empresa Centro Mecanizado Pérez, mediante la expresión:

$$\eta_{horno} = \frac{Q_{\acute{u}til}}{Q_{in}} \quad (2.35)$$

Donde:

$\eta_{horno}$ : Eficiencia térmica del horno, [kW]

$Q_{\acute{u}til}$ : Energía útil en el proceso de fundición del hierro [kW]

$Q_{in}$ : Energía de entrada [kW]

## 2.4. Parte experimental

Un balance térmico requiere del conocimiento de las fuentes y disposición del calor, en este caso, la fundición del hierro gris por cubilote considera las siguientes entradas y salidas, según se resume a continuación:

### 2.4.1. Ingreso de calor

- Calor entregado por el coque.
- Calor entregado por la oxidación del hierro, silicio y Manganeseo.
- Calor sensible en el aire de soplado.



### 2.4.2. Salida de calor

- Calentamiento, fusión y sobrecalentamiento del hierro a la temperatura de colada.
- Calcinación de la piedra caliza.
- Formación, fusión y sobrecalentamiento de la escoria.
- Descomposición de la humedad en el aire de soplado.
- Calor sensible en los gases de escape.
- Calor de reacción de los gases de escape.
- Pérdidas de calor por transferencia en el cubilote.

### 2.4.3. Eficiencia térmica

Para la determinación de la eficiencia térmica de un cubilote se considera dos relaciones:

**Eficiencia de fusión:** representada por  $\eta_{\text{fusión}}$  es la relación entre el calor entregado al hierro hasta alcanzar la temperatura de colada con respecto al calor entregado por el coque y la oxidación de los componentes (Fe, Si, Mn), Según la ecuación:

$$\eta_{\text{fusión}} = \frac{Q \text{ presente en el hierro a la } T_{\text{colada}}}{Q \text{ entregado por el coque + calor de la oxidación}} * 100 \quad (2.36)$$

a) **Eficiencia de combustión:** representada por  $\eta_{\text{combustión}}$ , se refiere a la eficiencia con que se quema el coque sin considerar el calor perdido por los gases con respecto al calor potencial del coque, según la reacción:

$$\eta_{\text{combustión}} = \frac{Q \text{ potencial del coque} - Q \text{ absorbidos por los gases por reacción}}{Q \text{ potencial del coque}} * 100 \quad (2.37)$$

## 2.5. Simulación ANSYS

ANSYS es un paquete computacional de elementos finitos de propósito genérico. Utilizado para el diseño y optimización o para la investigación de sistemas con un nivel de complejidad considerable, este análisis por elementos finitos consiste en

subdividir un sistema complejo en pequeños piezas de un tamaño seleccionado por el usuario.

### **2.5.1. Modelado computacional CFD en ANSYS**

Las tecnologías de simulación ANSYS CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) permiten a los profesionales de esta área optimizar el rendimiento de los productos que tienen que ver con los flujos de reacción de hornos, reformadores, motores de combustión interna, turbinas de gas, hornos metalúrgicos.

El módulo CFD de ANSYS es la herramienta dominante para la simulación de la combustión en quemadores para calderas, hornos e incineradores que permiten la predicción de las métricas de rendimiento crítico incluyendo las emisiones contaminantes y los efectos de la composición del combustible en la eficiencia de la combustión.

Esto se logra con una detallada configuración del modelo computacional a simular en el módulo con el fin de lograr un razonable Time-to-Solution.

## **2.6. Conclusiones del capítulo**

- En la determinación de la energía necesaria para la fusión del hierro intervienen una gran cantidad de procesos químicos que por un lado aportan con energía al proceso global, mientras que existen otras reacciones que consumen gran parte del calor generado en el proceso.
- Las pérdidas de energía por transferencia se calculan por secciones; esto es, paredes, base y chimenea, utilizando conceptos y fórmulas energéticas que tienen que ver con las diferentes formas de transferencia.
- La ecuación química 2.31 indica que la relación aire combustible es de 9.8 con un exceso de aire del 20%, dicho valor cae dentro de la zona de oxidación

pero el horno está funcionando fuera de los límites sugeridos según American Foundrymen's Society.

- La eficiencia térmica del horno de cubilote no solo es el cociente entre la energía útil y la energía entregada sino más bien se la expresa desde el punto de vista de la fusión y la combustión, según las ecuaciones 2.36 y 2.37.
- Se utiliza la simulación por elementos finitos con el software FEM "ANSYS Academic Student", para determinar la distribución de temperatura en el cubilote. El módulo CFD de ANSYS para el estudio es "Fluent".

## CAPÍTULO 3

### RESULTADOS DEL CÁLCULO DE LA EFICIENCIA TÉRMICA EN LA FUNDICIÓN DE HIERRO EN HORNO DE CUBILOTE

#### 3.1. Introducción

En este capítulo se analiza los parámetros estudiados del objeto de estudio que se muestra en la figura N° 3. 1. para la determinación de la eficiencia del horno de la Empresa Centro Mecanizado Pérez en la ciudad de Ambato dedicada a la fundición de hierro fundido, con una producción promedio de 10 Toneladas/mes; se analiza los años de servicio del horno, gastos periódicos de reparaciones, uso del coque como único generador de calor, posibilidades de recuperar los gases de combustión que sale por la chimenea.

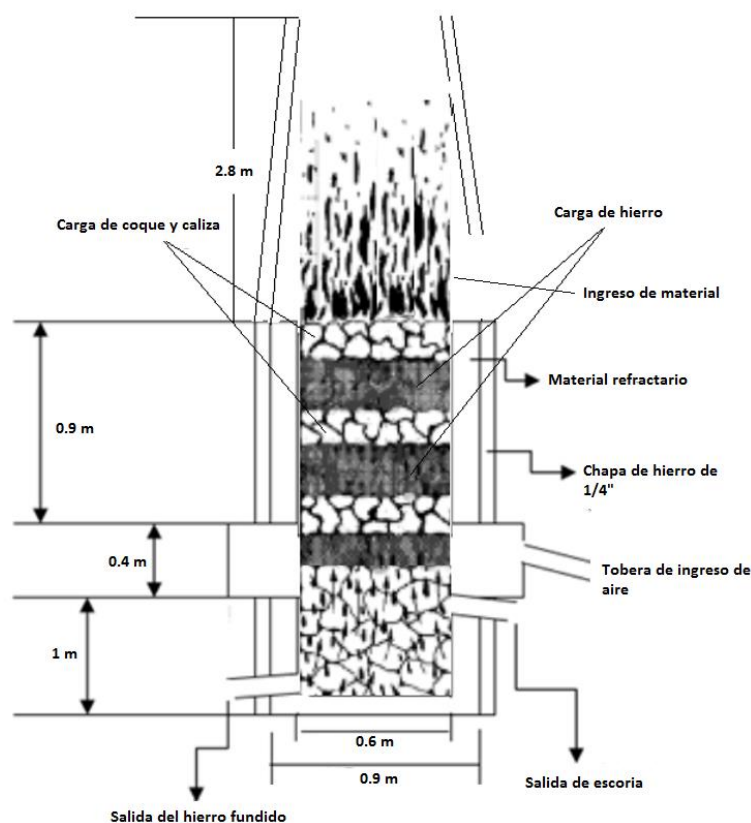


Figura N° 3. 1. Esquema de carga en el horno de cubilote

Por tanto los objetivos del capítulo son:

- Determinación de pérdidas de calor por conducción, convección y radiación.

- Determinación de la eficiencia de combustión y fusión del horno de fundición de hierro gris.
- Simular la energía total requerida por el horno mediante el método de elementos finitos.

### 3.2. Cálculo de la energía para la fundición del hierro gris.

La determinación de la energía requerida para fundir el hierro se fundamenta en las ecuaciones descritas en el capítulo anterior, los datos se los obtuvo por medición de temperaturas con la cámara termográfica Fluke, cuyas características se destacan en el anexo A las temperaturas medidas se encuentran en el anexo B.

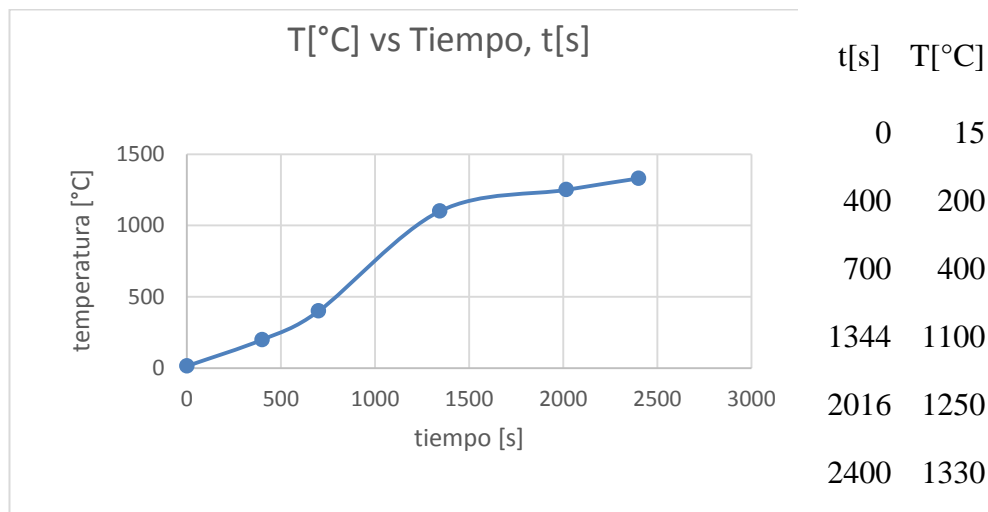
La capacidad de producción promedio mensual de la Empresa es de 10 Tn/mes, para ello se efectúa 4 fundiciones, una por cada semana, esto es 2.5 Tn por fundición y cada fundición tiene una duración de al menos 8 hr, las 4 horas iniciales sirve como preparación del horno y encendido del coque y las 4 restantes se producirá la fundición del hierro, el cual saldrá a razón de 0.32Tn por cada 30 a 40 min (producción tipo intermitente), lo que indica que se requerirá de 6 paradas y un tiempo mínimo de 4 horas de fundición. Luego de los cálculos realizados para el horno de cubilote se presentan dichos valores en la tabla No. 3.1:

**Tabla N° 3. 1.** Resultados obtenidos para alcanzar la temperatura de colada.

<b>Descripción</b>	<b>Calor [kJ]</b>	<b>Flujo de calor [kW]</b>	<b>Ecuación</b>
Energía requerida para el primer cambio de temperatura, hasta alcanzar el punto de fusión.	611 325	454,8549	(2.1)
Energía requerida para el cambio de fase	182 875	272,1354	(2.2)
Energía requerida para llegar a la temperatura de colada	54 340	141,5104	(2.3)
Energía mínima necesaria para fusión del hierro	848 540	868,8007	(2.4)

La tabla No. 3.1 muestra los flujos de calor requeridos para la fundición de 625 kg/h de hierro de 30°C a 1330°C, evidenciando que la mayor cantidad de flujo calórico es de tipo sensible.

La figura 3.2 muestra la curva de la temperatura que alcanza el hierro versus el tiempo en segundos, es decir la variación de la temperatura del hierro en función de los aproximadamente 40 min que demora el hierro en alcanzar la temperatura de colada, se puede observar como la temperatura sube hasta alcanzar la temperatura de fusión del hierro gris donde permanece casi constante y posteriormente sube aún más la temperatura hasta alcanzar la temperatura de colada.



**Figura N° 3. 2.** Curva de calentamiento del hierro fundido temperatura vs tiempo.

Esto irá oscilando en el tiempo por cada parada entre la temperatura de fundición y la de colada. En la figura se puede observar que la rapidez de aumento de temperatura es constante hasta alcanzar la temperatura de fusión a partir de la cual el aumento de temperatura decrece, lo que indica el cambio de fase.

La figura 3.3 visualiza la curva de calentamiento del hierro gris, representada por el calor entregado por el proceso vs temperatura alcanzada por el hierro que va a fundirse, las etapas de calentamiento como es de esperar son tres, un calor

sensible hasta alcanzar la temperatura de fusión, un latente correspondiente al cambio de fase y un sobre calentamiento hasta la temperatura de colada.

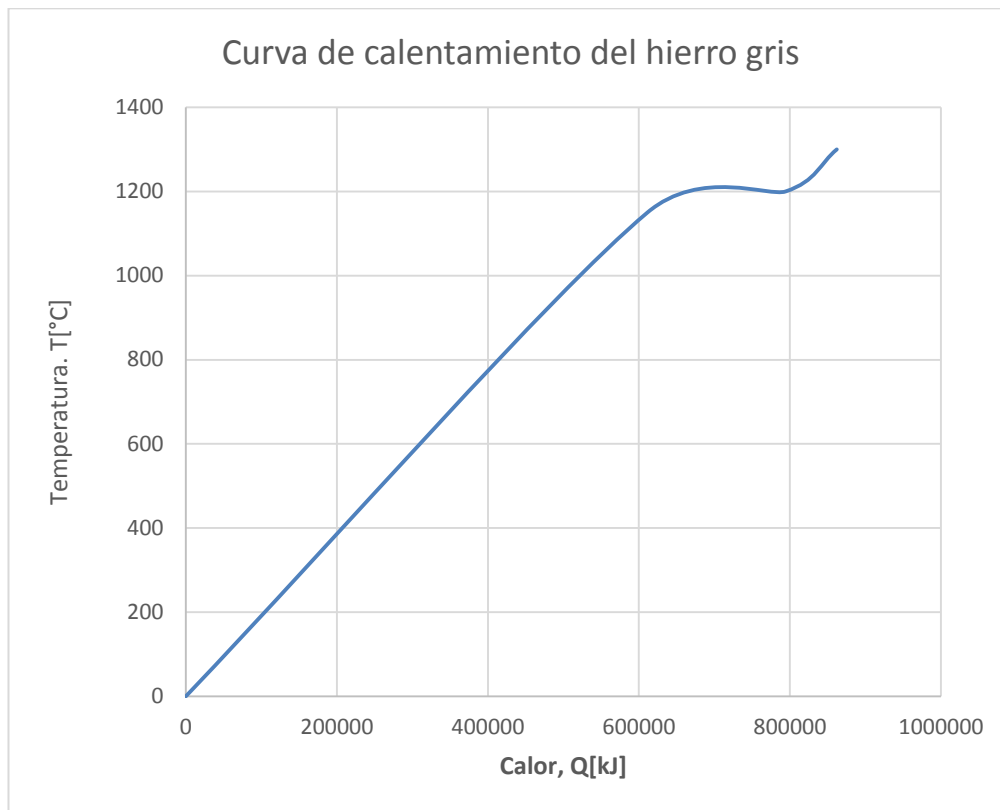


Figura N° 3. 3. Diagrama curva de calentamiento Q vs T del hierro.

### 3.3. Determinación de las pérdidas de energía por transferencia de calor de las paredes.

Es evidente que en el horno hay pérdidas de calor las cuales pueden ser calculadas, y como ya se dijo en el capítulo anterior las pérdidas se dan por tres tipos de transferencias conocidas, específicamente por las paredes, salida de los gases y base del horno.

Una vez conocida la cantidad de energía necesaria para fundir el hierro a la temperatura de colada, se calcula las pérdidas producidas a través de la Ec. 2.21, para lo cual se realizó algunas consideraciones, tales como, los flujos de calor conductivos se los realizó en forma directa usando los valores tabulados de los coeficientes de conductividad en tablas (Incropera, 1999), en cambio que los convectivos internos y externos son evaluados bajo consideraciones de

convección natural. Y su determinación se la hace previo la determinación de los coeficientes de convección.

**Tabla N° 3. 2.** Valores obtenidos de las resistencias térmicas de conducción.

Descripción	Ri [°C/W]	Ecuación
$R_{cond1}$ : Resistencia térmica del ladrillo refractario	0,05159	2.6
$R_{cond2}$ : Resistencia térmica de la chapa de acero	0,0000252	2.7

A continuación se determina los coeficientes de convección en el exterior del horno:

**Tabla N° 3. 3.** Valores obtenidos de los coeficientes de convección.

Descripción	Resultado	Ecuación
Temperatura de película, $T_f$	60 °C.	2.10
Número de Grashof, $Gr_L$	$6,9724 \times 10^{10}$	2.11
El cilindro se considera como placa vertical si se cumple: $D \geq \frac{35L_c}{Gr_L^{1/4}}$	$0,9614 \geq 0,1566$	2.12 Entonces se considera como placa
Número de Rayleigh, $Ra_L$	$5,019 \times 10^{10}$	2.13
Número de Nusselt. $Nu$ Como: $Ra_L > 10^9$	421,0679	2.14
Coefficiente de convección externo, $h_3$	5,14 [W/m <sup>2</sup> °C]	2.15
Resistencia térmica conectiva externo, $R_{conv 2}$	0,0297 [°C/W]	2.9

La determinación del coeficiente de transferencia de convección de los gases en el interior del horno, requiere del conocimiento de la velocidad de los gases en su



interior, que puede ser calculada conociendo el flujo de entrada y las características del aire una temperatura promedio de las diferentes zonas del horno, los parámetros requeridos se toman (Incropera, 1999).

**Tabla N° 3. 4.** Valores obtenidos de los coeficientes de convección.

Descripción	Resultado	Ecuación
Velocidad de los gases , m/s	1,196 m/s	dato experimental
Temperatura de cálculo	1 000°C	Promedio de las zonas
Número de Reynolds	12 072,06	2.16
Número de Nusselt. $Nu$	37,28	2.17
Coefficiente de convección externo, $h_1$	4,89	2.18
Resistencia térmica por convección del fluido interno, $R_{conv_1}$ [°C/W]	0,0471768	2.8
Resistencia global, $R_{total}$	0,128	2.19
Flujo de calor por conducción y convección, $Q_{conv-cond}$ [W]	7 153,0597	2.20
Flujo de calor por radiación, $Q_{rad}$ [W]	3 804,2571	2.21
Flujo de calor total perdido por las paredes, [W]	11 392,1241	2.22

Una vez obtenidos los coeficientes de convección, se calcula las resistencias y flujos de calor. Dichos valores indican que la mayor parte del calor perdido por las paredes es debido a la convección y conducción y en menor grado la radiación.

### **3.4. Determinación de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la chimenea.**

Para la determinación del flujo de calor perdido por la chimenea se considera para el cálculo la temperatura de película, entre los alrededores y el promedio de la temperatura de la pared de la chimenea que fueron medidas experimentalmente y basándose en la teoría de transferencia de calor se determina los coeficientes requeridos para calcular el coeficiente de convección externo. De igual manera se

procede para la determinación del coeficiente de convección interno. Los valores obtenidos se muestran en la tabla 3.5.

**Tabla N° 3. 5.** Valores obtenidos de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la chimenea.

<b>Descripción</b>	<b>Resultado</b>	<b>Ecuación</b>
Temperatura de los alrededores	25°C	medido
Temperatura promedio de la superficie de la chimenea	205°C	
Temperatura de película, $T_f$	120 °C.	2.10
Número de Grashof, $Gr_L$	1,73E+11	2.11
$D \geq \frac{35L_c}{Gr_L^{1/4}}$ , como placa	0,8 $\geq$ 0,152	2.12
Número de Rayleigh, $Ra_L$	1,22E+11	2.13
Número de Nusselt. $Nu$ Como: $Ra_L > 10^9$	511,02	2.14
Coficiente de convección externo en la zona de la chimenea, $h_3$	5,9059 [W/m <sup>2</sup> °C]	2.15
$R_{conv 2}$ externa	0,0241 [°C/W]	2.9
Resistencia térmica conducción $R_{cond}$	9,36x10 <sup>-6</sup> [°C/W]	2.7
Velocidad de los gases, m/s	1,26 m/s	Calculado
Temperatura de cálculo	500°C	Promedio
Número de Reynolds	7 476,07	2.16
Número de Nusselt. $Nu$	60,3251	2.17
Coficiente de convección interno, $h_1$	4,20	2.18
Resistencia térmica por convección del fluido interno, $R_{conv 1}$	0,0338 [°C/W]	2.8
Resistencia global, $R_{total}$	0,0579	2.19
Flujo de calor por conducción y convección, $Q_{conv-cond}$	8 032,3226 W	2.20
Flujo de calor por radiación, $Q_{rad}$	16 894,669 W	2.21
Flujo de calor total perdido por la chimenea	24 950,09 W	2.22

Una vez calculado los coeficientes de convección, sus resistencias se determinan los flujos de calor por conducción-convección y por radiación.

En esta parte del horno las pérdidas por radiación son en mayor grado que las de conducción y convección, debido a que es zona del horno no cuenta con una capa aislante térmico.

### 3.5. Determinación de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la base.

No es menos importante la zona que corresponde a la base del horno, aunque constituye una zona muy bien recubierta por revestimiento de refractario, existe pérdidas de calor. En la tabla No. 3.6 se muestran los valores que sirven de base para la determinación de los flujos de calor perdidos.

Para esta zona que contiene únicamente coque sólido y hierro fundido, no se considera pérdidas por convección sino únicamente por conducción.

**Tabla N° 3. 6.** Valores obtenidos de las pérdidas de energía por transferencia de calor por la chimenea.

Descripción	Resultado	Ecuación
Temperatura de los alrededores	25°C	medida
Temperatura promedio del crisol	1 200°C	medido
Temperatura de la superficie de la base	112°C	medido
Temperatura de película, $T_f$	68,5°C.	calculado
Espesor de la capa sílice vitria	0,1 m	medido
Conductividad térmica de la sílice vitria	1,4 [W/m·°K]	tabulado
Resistencia térmica por conducción $R_{cond}$	0,2526 [°C/W]	2.25
Resistencia térmica por conducción de la chapa de acero	$5,2648 \times 10^{-4}$ [°C/W]	2.7
Resistencia total	0,22	2.19
Flujo de calor por conducción	5 793,7275 W	2.26
Flujo de calor por radiación, $Q_{rad}$	497,8821 W	2.21
Flujo de calor total perdido por la base	6 291,6096W	2.22

Para esta zona el flujo que se impone es por el calor de conducción, se podría decir que la radiación es mínima, pero existe. La figura 3.4 muestra a través de un diagrama de barras la influencia de las pérdidas por cada una de las partes en que se ha dividido el horno.

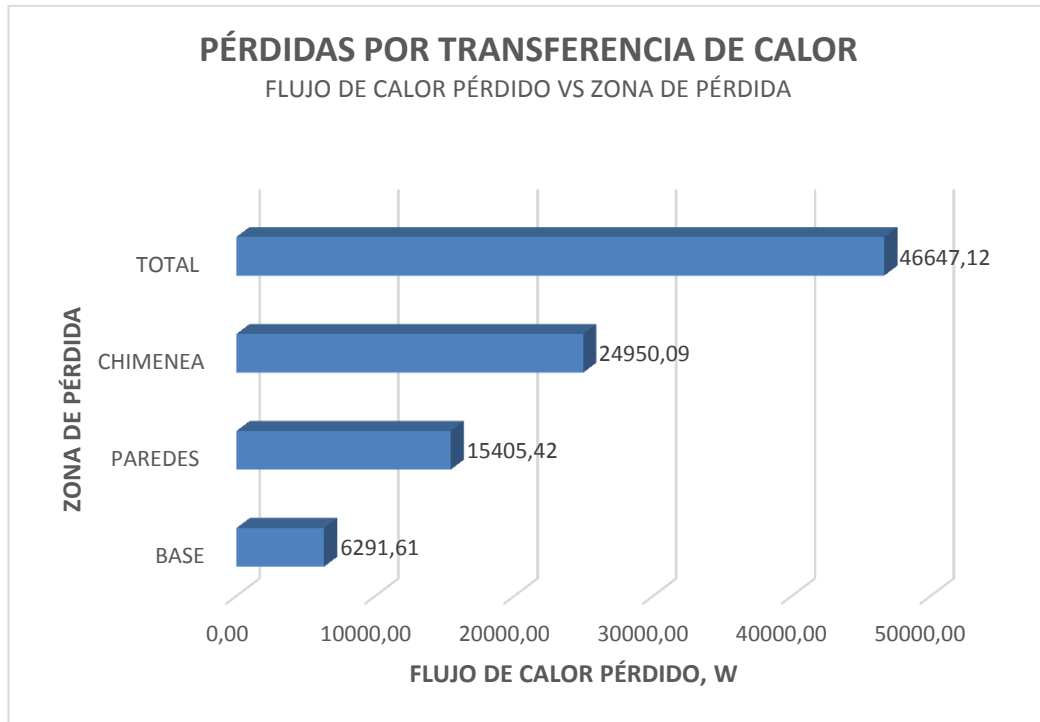


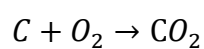
Figura N° 3. 4. Diagrama Flujo de calor perdido.

Según los valores obtenidos, se puede decir que el calor perdido por la base del horno representa el 13.5% del total de las pérdidas seguido del calor perdido por las paredes que constituye el 33.02% y la gran mayoría se pierde por la zona de la chimenea.

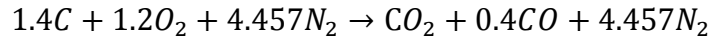
### 3.6. Determinación de las pérdidas de calor por gases de combustión.

#### Reacciones de combustión en el horno de cubilote.

El contacto del coque incandescente con el aire de sople produce la combustión completa ideal según la reacción:



Sin embargo, puede generarse la combustión incompleta y con ello la generación del CO, por cuya razón el ingreso de aire deberá ser de un 20% más, en cuyo caso la ecuación teórica producirá una combustión incompleta, como se muestra:



La tabla No. 3.7 muestra el calor de combustión y el poder calorífico para la reacción de combustión con un exceso de aire. Estos valores se determinaron a condiciones estándar.

**Tabla N° 3. 7.** Calor de combustión del coque.

Coque		
Calor de combustión, Ec química 2.31	312,6642 kJ/mol a C.S.	calculado 2.32
Poder calorífico	26 055,3 kJ/kg C	Calculado

En la determinación de la eficiencia del horno es necesario conocer la relación aire combustible. En la tabla No. 3.8 se muestran las ecuaciones químicas de combustión.

En el caso de usar el 20% de exceso de aire, se tendría una composición de 17.07% de CO<sub>2</sub>, 6.82% CO y la diferencia de 100 de nitrógeno, como se dijo anteriormente el sistema cae en la zona de exceso de aire que no es recomendado para estos casos, según asociación de fundidores americanos.

Se utilizó el diagrama de la figura 2.6 para la determinación de la relación aire combustible aconsejable para un buen manejo de la operación del cubilote. La lectura del diagrama indica que los gases de combustión tendrán una composición del 11% de CO, 14% CO<sub>2</sub> y el resto constituirá el nitrógeno.

En la tabla 3.8 se encuentra las reacciones termoquímicas para los dos casos considerados con sus relaciones importantes.

Tabla N° 3. 8. Relación aire combustible.

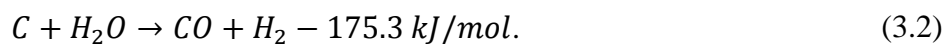
Descripción de la combustión	$m_{comb}$ C kg	$m_{comburente}$ O <sub>2</sub> kg	$m_{N2}$ kg	$r \frac{aire}{combustible}$	$\frac{m^3}{min} \text{ aire}$
$1,4C + 1,2O_2 + 4,457N_2 \rightarrow CO_2 + 0,4CO + 4,457N_2 + 312,6642 \text{ kJ/mol}$					
20% de exceso de aire	16,8	38,4	124,79	9,71	12.84
$0,25C + 0,195O_2 + 0.73N_2 \rightarrow 0.14CO_2 + 0.11 CO + 0.73N_2 + 269 \text{ kJ/mol}$					
Composición sugerida	3	6.25	20.44	8.89	11.76

La relación aire/combustible con la que se aconseja trabajar es de 8.89 y que la capacidad calorífica del coque a esas condiciones es de 5 362, 92 kcal/mol que es igual a 9 673 BTU/lb de coque.

Existen otras reacciones que son importantes dentro del proceso y que merman el poder calorífico del combustible, estas son las que se producen por la gasificación por  $CO_2$  y la gasificación por vapor del agua, según las siguientes reacciones:



La pérdida de energía por la ecuación 3.1 se ve favorecida por la producción de CO que actuará como un agente reductor para impedir que el metal de carga se oxide. En la ecuación 3.2 se muestra la gasificación con el vapor de agua, cuyo calor de reacción puede ser despreciado, ya que por una parte la cantidad consumida depende de la humedad del aire que es baja y adicionalmente produce hidrógeno molecular que es un combustible.



La pérdida de energía por la combustión del coque y el aire, requiere de un balance de energía del proceso estable, dado por la primera ley de la termodinámica, así:

$$\sum \dot{E}_{in} - \sum \dot{E}_{out} = \frac{\partial m}{\partial t}$$

Donde:

$\sum \dot{E}_{in}$ : Sumatoria de energías que ingresan al sistema, [kJ/s]

$\sum \dot{E}_{out}$ : Sumatoria de las energías que salen del sistema, [kJ/s]

$\frac{\partial m}{\partial t}$ : Variación de masa con respecto al tiempo, [kJ/s]

En la fundición de 2500 kg de hierro se utiliza 376 kg de coque en un promedio de 4 horas. Hay que considerar que se utiliza coque también para la cama en el crisol, aproximadamente unos 307 Kg que pueden ser reutilizados en otro proceso de fundición.

### 3.7. Balance térmico del cubilote.

#### a) Calor entregado al sistema por los diferentes componentes del proceso:

La tabla No. 3.9 muestra los calores entregados al sistema por la combustión del coque, la oxidación de los elementos presentes (Fe, Si, Mn) y el calor sensible del aire de soplo. Los calores de formación fueron tomado de American Foundrymen's Society Pg. 853.

**Tabla N° 3. 9.** Calor suministrado.

calor potencial neto suministrado por el coque, kcal	586 159,99
calor por oxidaciones:	
Fe	755,901
Si	3 650,535
Mn	2 407,496
Total del calor por oxidación	6 813,933
Calor sensible del aire de soplo	7 357,695
<b>TOTAL DE CALOR SUMINISTRADO</b>	<b>600 331,620 kcal</b> <b>30 755,164 kJ</b>

El calor total suministrado al sistema de fundición está dado por el poder calorífico del coque, el calor de formación de la oxidación de los elementos presentes en el hierro y la energía que contiene el aire de soplo. Esta cantidad de

energía será utilizada en los diferentes procesos de la fundición del hierro, los cuales se describen en la tabla No. 3.10.

**b) Calor utilizado por el sistema por los diferentes componentes del proceso:**

**Tabla N° 3. 10.** Calor total del sistema.

Calentamiento, fusión y sobrecalentamiento del Fe <sub>gris</sub>	203 000,000
Calcinación de la piedra caliza	15 074,688
Calor neto necesario para el escoriado	10 318,654
Calor necesario para la descomposición del agua en el aire	11 844,435
Formación, fusión y sobrecalentamiento de la escoria	10 318,654
Descomposición de la humedad del aire de soplado	13 198,084
Calor sensible de los gases de escape	38 394,326
Calor de combustión del CO	180 951.768
<b>TOTAL DEL CALOR QUE UTILIZA EL SISTEMA</b>	<b>472 781,956 kcal</b> <b>1976228,576 kJ</b>

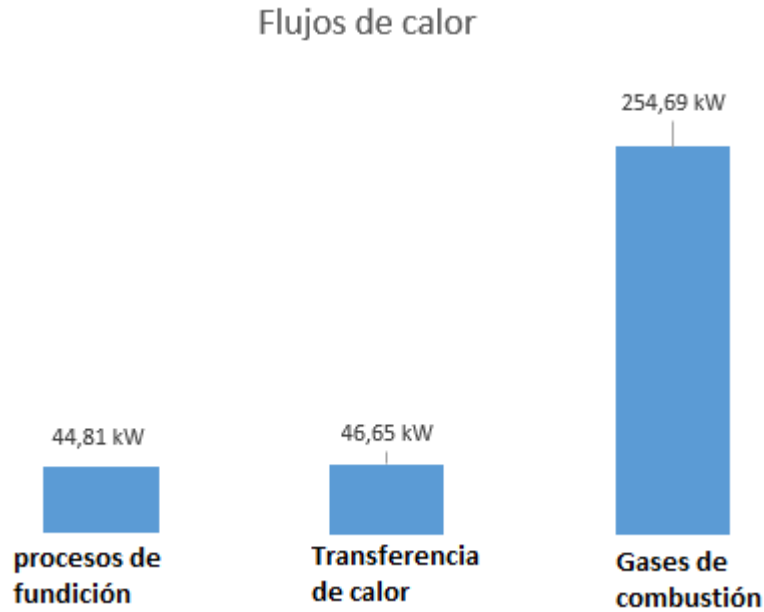
Como se puede observar existe una diferencia entre el calor suministrado al sistema por diferentes medios y el calor utilizado por el sistema por los distintos procesos para la fundición del hierro gris, esta es la pérdida de calor hacia los alrededores, los cuales se pretende recuperar en algún porcentaje. Esto permitirá que se logre una mayor eficiencia del horno, disminuya la contaminación por gases de invernadero y además se recuperaría material particulado.

A continuación se visualiza en la figura No. 3.5, las pérdidas de energía en forma de flujos

La primera se debe a tres procesos: calcinación de la caliza, formación, fusión, sobrecalentamiento de la escoria y la descomposición del agua presente en el aire.



La segunda debido a pérdidas por transferencia de calor y por último las pérdidas debido a los gases de combustión, que constituyen un gran porcentaje del total de energía disponible.



**Figura N° 3. 5.** Flujos de calor perdidos en el proceso de fundición de hierro gris.

La figura No. 3.5 muestra claramente que la cantidad de energía perdida se da por los gases de chimenea.

**c) Determinación de la eficiencia del horno.**

El cálculo de la eficiencia del horno de fundición de hierro gris es importante para constatar su buen funcionamiento o caso contrario entablar reformas a sus parámetros operacionales que permitan mejorar dicho valor.

La determinación de la eficiencia para este caso se prefiere realizarla desde dos puntos de vista el primero la fusión y el segundo la combustión.

**Tabla N° 3. 11.** Valores de eficiencia.

EFICIENCIA DE FUSIÓN	$\eta_{\text{fusión}} = 33.43$	2.31
EFICIENCIA DE COMBUSTIÓN	$\eta_{\text{combustión}} = 69.12$	3.32

### 3.8. Modelado computacional CFD en ANSYS.

#### 3.8.1. Simulación del horno mejorado.

Las tecnologías de simulación ANSYS CFD (Dinámica de Fluidos Computacional) permiten a los profesionales de esta área optimizar el rendimiento de los productos que tienen que ver con los flujos de reacción de hornos, reformadores, motores de combustión interna, turbinas de gas.

Esto se logra con una detallada configuración del modelo computacional a simular en el módulo con el fin de lograr un razonable Time-to-Solution.

### 3.9. Simulación del horno de cubilote usando Ansys.

#### 3.9.1. Modelo CAD del horno de cubilote.

Tomando en cuenta las características del horno de fundición se generan dos modelos CAD. El primero corresponde al horno de cubilote original (A) y el segundo al horno de cubilote modificado con ciertas características en su entorno y concepción que pretende aumentar su eficiencia térmica (B).

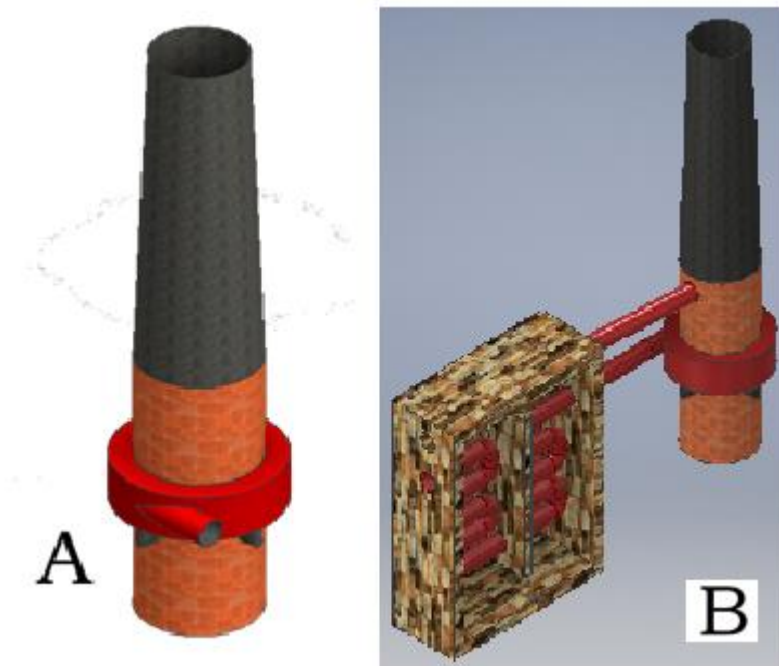


Figura N° 3. 6. Configuración de los modelos CAD en Workbench ANSYS 17.0.

### 3.9.2. Mallado de los modelos.

Es fundamental configurar el modelo computacional como un volumen finito y obtener una malla correspondiente a cada modelo CAD. A continuación, se presenta una configuración de malla tipo Skewness con un promedio para cada modelo de 0.2.

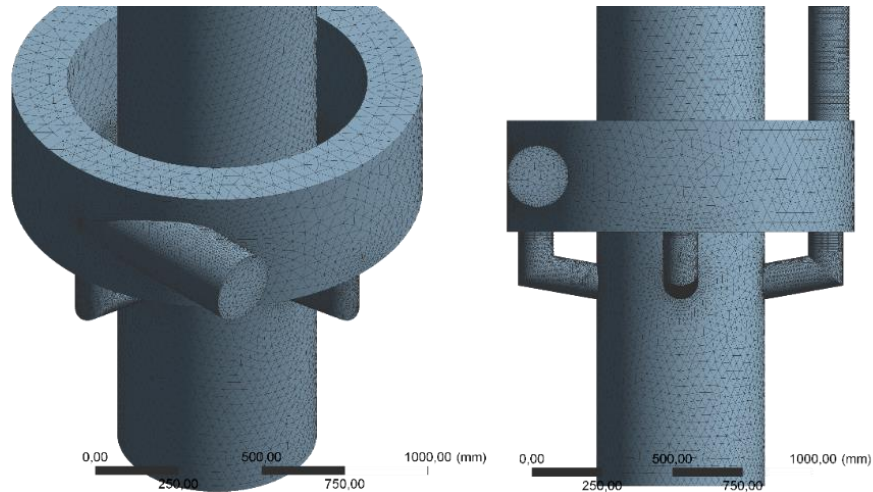


Figura N° 3. 7. Configuración de malla tipo Skewness

### 3.9.3. Diagrama de manejo de programa.

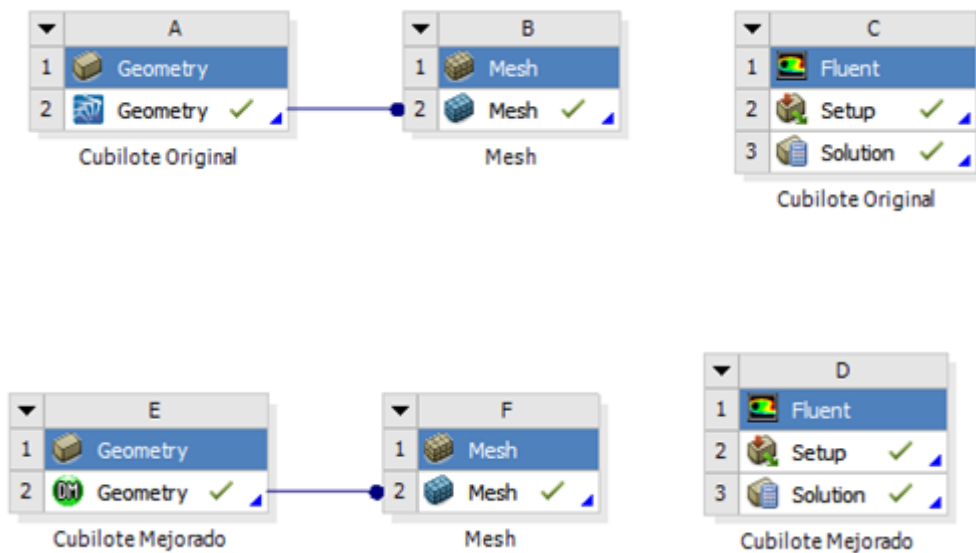


Figura N° 3. 8. Diagrama de manejo del programa.

### 3.10. Conclusiones del capítulo.

- Se utilizó la fundamentación teórica para la determinación de los flujos perdidos por transferencia, verificándose que un 53.5% son debidas a la zona de la chimenea.
- Las cargas de material tienen un tiempo de alrededor de 30-40 min para llegar a su temperatura de colada.
- La curva de calentamiento del hierro muestra las tres regiones como se esperaba, la zona de precalentamiento del mineral es la que más energía consume y la que más se demora.
- La ecuación termoquímica para el proceso viene dada por:  
$$0,25C + 0,195O_2 + 0.73N_2 \rightarrow 0.14CO_2 + 0.11 CO + 0.73N_2 + 269 \text{ kJ/mol},$$
con una relación de aire/combustible de 8.89.
- Del balance energético se desprende que de la energía total suministrada al proceso de fundición un porcentaje de ella es utilizada para los procesos intermedios, otra parte se pierde como resultado de la transferencia y una gran parte es eliminada por la chimenea.
- El rendimiento de horno de cubilote de la empresa centro Mecanizado Pérez son  $\eta_{\text{fusión}} = 33.43\%$  y  $\eta_{\text{combustión}} = 69.12\%$

## **CAPÍTULO 4**

### **PROPUESTA DE MEJORA ENERGÉTICA EN EL PROCESO DE FUNDICIÓN DE HIERRO FUNDIDO.**

#### **4.1. Introducción.**

En el presente capítulo se realiza el análisis de la propuesta de mejora del proceso de fundición de hierro fundido en el horno de cubilote en la empresa Centro Mecanizado Pérez de la Ciudad de Ambato.

Esta propuesta consiste en el precalentamiento del aire aprovechando los gases de escape, mediante el uso de un intercambiador de calor.

#### **4.2. Título de la propuesta.**

Modelamiento de un sistema de precalentamiento de aire, mediante el aprovechamiento de gases de escape en la chimenea para incrementar la eficiencia energética en el sistema de fundición.

#### **4.3. Justificación de la propuesta.**

La Empresa Centro Mecanizado Pérez que se halla localizada en la ciudad de Ambato considerando que demanda de hierro fundido crece año a año al igual que los estándares de calidad del producto final.

Debido a la necesidad de reducir costos de producción y apegarse a las normas vigentes tanto de calidad del producto como de protección ambiental La empresa requiere introducir alguna alternativa de mejoramiento energético en donde se encuentre la posibilidad de economizar gastos, aprovechar el recurso humano, ahorrar el combustible, mejorar la producción, y la calidad del hierro fundido.

Con esta propuesta se pretende reducir las ppm de carbono no combustionadas emitidas al ambiente como material particulado y al disminuir el consumo de coque que se requeriría para calentar el aire.

Se reducirá el tiempo del proceso; hecho que permite aprovechar recursos humanos al procesar más cantidad de paradas.

En la zona central del país existen restricciones por las municipalidades con respecto a la emisión de los gases para este tipo de empresas, de ahí la necesidad de montar un sistema que logre palear en algo la contaminación ambiental. Y sobre todo los requerimientos de aumentar la producción y mejorar la calidad de producto.

#### **4.3.1. Metodología.**

La propuesta comienza con un tipo de investigación de estudio exploratorio, del horno de cubilote actual seguido de una investigación descriptiva donde se hace el modelamiento y simulación del horno de cubilote original y un prototipo que aproveche los gases de chimenea para calentar el aire de ingreso a la cámara de viento en el horno de cubilote.

Su modalidad es semi-experimental porque el propósito es buscar la causa de un efecto, hay manipulación directa a las condiciones.

El dimensionamiento de los componentes del intercambiador, fue un proceso iterativo, con el fin de equilibrar la capacidad de transferencia de calor dada por el arreglo del tubo, a la salida del horno y el flujo de calor que se pueda aprovechar de los gases de escape. En este caso se considera la desviación de un 25- 75% de los gases de salida.

Se ha calculado la cantidad de calor perdida por la chimenea, inicialmente se estima el flujo de gases de escape y la cantidad de calor liberada por ellos, el flujo de aire se calcula a través del balance energético en la cámara de calentamiento.

El dimensionamiento del área de transferencia se basa en el método LMTD. La forma de la cámara de calentamiento se acopla a la forma y tamaño de la salida del horno, con ello se determina la cantidad de energía que puede suministrar el arreglo de tubos instalados a 1.5 m del horno. Con este valor se calcula el rendimiento del horno prototipo y se determina la mejora en los gases de combustión.

El ventilador que se dispone será suficiente para el ingreso del soplo del aire que deberá pasar primero por el intercambiador formado por un tubo de hierro estructural de 300 mm. de diámetro que lleva el aire frío, este tubo maquinado estará en contacto con el aire que viene de la chimenea e ingresa a una cámara de paredes refractarias, para evitar las pérdidas.

#### **4.4. Estructura de la propuesta.**

Existe una energía perdida que no es aprovechada, y para recuperarla en algún porcentaje se realiza una revisión del estado del arte para seleccionar una de las alternativas que convenga a la empresa. Una vez seleccionada la propuesta se modelara el prototipo y se simulara en Ansys.

Se utilizarán los resultados de los cálculos de las pérdidas caloríficas en el horno actual para hacer la simulación del horno prototipo. A partir de la producción mensual de hierro fundido de la Empresa Centro Mecanizado Pérez, se realizará un análisis de las simulaciones del horno prototipo para recuperar pérdidas energéticas.

Por último se hará un análisis económico para comprobar la factibilidad de la implementación de la mejora del horno en la Industria Centro Mecanizado Pérez en la ciudad de Ambato.

## **4.5. Desarrollo de la propuesta.**

### **4.5.1. Investigación bibliográfica.**

La propuesta está sustentada en trabajos similares. (Lee., 2003) muestra que un sistema de fundición de aluminio convencional, mejorado con un sistema de precalentamiento y circulación de gases, disminuye el consumo de combustible 38%, mientras que (Golón, 2009), indica que la utilización de un recuperador del calor para el horno tipo cubilote produce beneficios económicos al aumentar la eficiencia del horno reducir el consumo de combustible, Así también (Acevedo, agosto 2011) demuestra que la disminución en consumos energéticos mediante plasma se encuentra alrededor del 45%.

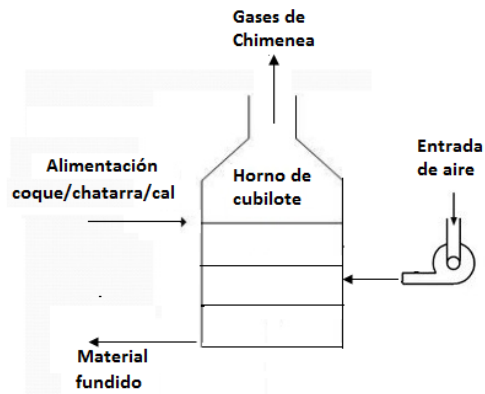
Estos hechos como calentamiento del combustible o del comburente por diferentes vías traen consigo menos pérdidas energéticas, más aprovechamiento de exergía y menor producción de residuos contaminantes.

Según (Golón, 2009), un sistema recuperador de calor es el método más ampliamente empleado, y generalmente con éxito, que utiliza tanto el calor sensible como el latente de los gases del cubilote. En este sistema una gran porción de todos los gases del cubilote se extraen de él a través de salidas o “tomas” situadas en el revestimiento y localizadas ya sea arriba o abajo de la puerta de carga. Para la propuesta se considera el uso de calor sensible de los gases de escape.

#### **a) Horno de cubilote actual.**

El horno de cubilote de la Empresa Centro Mecanizado Pérez funciona 4 veces al mes, al menos, durante 8 horas por cada vez, de acuerdo con los cálculos hechos se tiene que la cantidad de pérdidas de energía no son únicamente por transferencia y radiación, sino también por la energía que llevan los gases de chimenea. A continuación el diagrama del proceso de fundición.





**Figura N° 4. 1.** Diagrama P&ID del proceso de fundición del horno actual.

De acuerdo a los datos estadísticos de la empresa Centro Mecanizado Pérez, se procesa mensualmente aproximadamente 10000 kg hierro tipo chatarra, lo que implica un consumo de 1503.56 kg de coque con una pureza del 82% de carbono y 1200 kg de coque para la cama, es decir 2703.56 kg de coque en total. Según anexo D el poder calorífico del coque es 8028.9 kJ/kg de coque, La producción es tipo intermitente con cargas del de 2500 kg de chatarra/375.89 kg coque/147.87 kg de caliza por semana.

#### **b) Prototipo del horno.**

En base a bibliografía revisada se procede con la propuesta de la mejora tecnológica, seleccionando el aprovechamiento de los gases de chimenea, Se intercala un intercambiador de calor a contra corriente, entre el horno y el ventilador, por un lado los gases de combustión serán derivados al intercambiador entrando a la cámara de calentamiento donde el aire frío pasa a través de un tubo e ingresara a la tobera del horno para producir la combustión , los gases de chimenea serán absorbidos por un extractor.

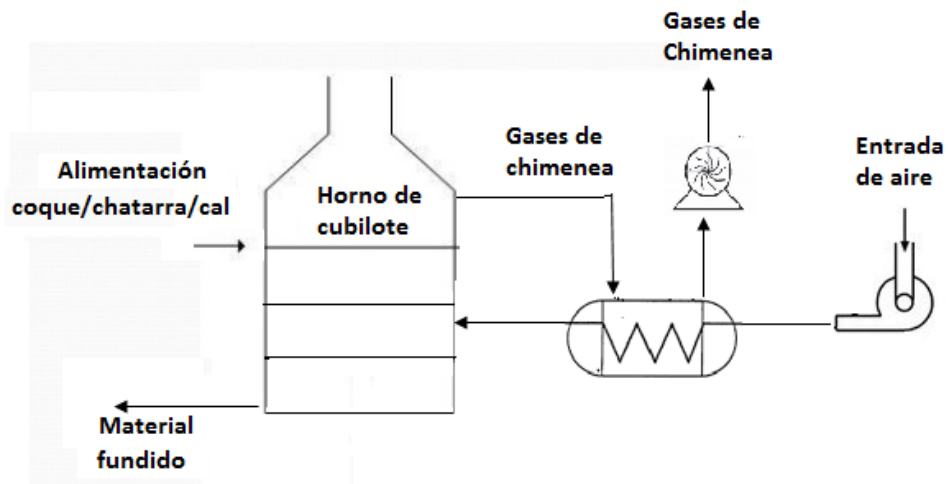


Figura N° 4. 2. Diagrama P&ID del proceso mejorado.

Una de las formas más adecuadas de verificar el aprovechamiento de los gases de escape es mediante la simulación por medio del programa Ansys. El módulo CFD de ANSYS es la herramienta dominante para la simulación de la combustión en quemadores para calderas, hornos e incineradores que permiten la predicción de las métricas de rendimiento crítico incluyendo las emisiones contaminantes y los efectos de la composición del combustible en la eficiencia de la combustión.

La verificación de este aprovechamiento de los gases de escape se logrará comparando el rendimiento en la situación actual (valor teórico) con la situación modificada en cuyo caso se usara la simulación en el programa Ansys en el módulo CFD.

El propósito de este trabajo es simular el recuperador de energía que mejore la eficiencia, disminuya el consumo de combustible y emisiones contaminantes.

Para ello se consideró conveniente recuperar parte de la energía liberada por la chimenea del horno con el fin de calentar aire, que circulará por la cámara de calentamiento, a la cual se direcciona los gases de chimenea en contra corriente

con el aire que recorre la cámara en un tubo y finalmente sale a la cámara de viento del cubilote a mayor temperatura.

#### 4.5.2. Cámara de calentamiento.

La Cámara de calentamiento se ajusta al espacio requerido por la única tubería de 6" céd 20, por donde circula el aire insuflado por un ventilador de 10 HP que dispone la empresa, en contra corriente ingresa los gases de combustión que son absorbidos por un extractor. El plano de la cámara se halla en el anexo C y sus dimensiones son:

Largo: 1.1 m                  Ancho: 2.3 m.                  Altura: 2.8 m.

La mampostería es de ladrillo refractario y tendrá 3 secciones: la zona de ingreso de los gases de combustión y aire, una segunda zona constituirá la zona de transferencia formada por dos cámaras y la tercera corresponde a la zona de la base, que dispone de aberturas para la limpieza del material particulado.

La forma que adopta el prototipo corresponde a la de los hornos tipo Griffin que es una tecnología alemana probada con éxito, hay de dos etapas o de una sola, la segunda es la escogida para la propuesta a desarrollarse, a continuación se muestra el diagrama del equipo de calentamiento de aire soplado, de una etapa sugerida por los hornos tipo Griffin, según (Society, 1977).

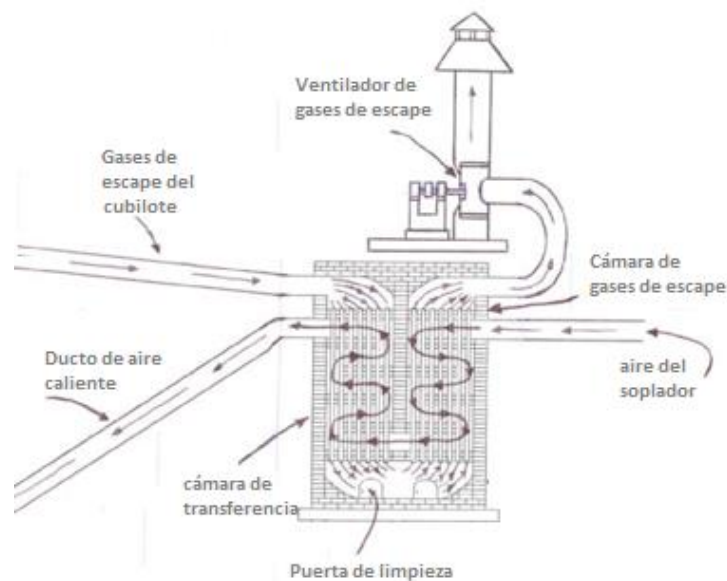


Figura N° 4. 3. Diagrama de la cámara de calentamiento.

Fuente: American Foundrymen's Society.

### 4.5.3. Dimensionamiento de la cámara de calentamiento

Para la determinación del área de transferencia entre los gases de combustión y el aire, se emplea el método LMTD (diferencia de temperatura media logarítmica), ya que se cuenta con el conocimiento de los parámetros de entrada y salida y sus flujos másicos de los fluidos, con esto es posible determinar el coeficiente de transferencia global U.

La capacidad de calor de los gases de chimenea pueden ser transferidos en una gran proporción al intercambiador de calor, La energía que se puede absorber está dada a través de la expresión siguiente.

$$Q = UA\Delta T_{ml} \quad 4.1$$

Donde:

U: coeficiente global de transferencia.

A: área de transferencia.

$\Delta T_{ml}$ : Diferencia media logarítmica.

La diferencia de temperaturas media logarítmica está dada a través de la siguiente expresión.

$$\Delta T_{ml} = \frac{\Delta T_2 - \Delta T_1}{Ln \frac{\Delta T_2}{\Delta T_1}} \quad 4.2$$

Donde:

$\Delta T_{ml}$ : Diferencia media logarítmica.

$$\Delta T_1 = T_{C2} - T_{F1}$$

$$\Delta T_2 = T_{C1} - T_{F2}$$

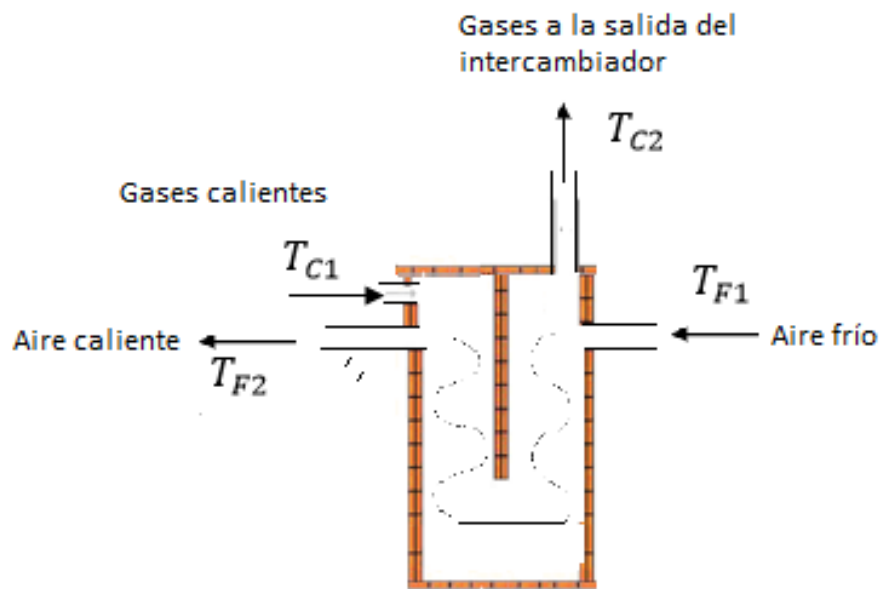
La determinación de la eficiencia está dada por la ecuación siguiente:

4.3

$$E = \frac{(T_{F2} - T_{F1}) C_{pF}}{(T_{C1} - T_{C2}) C_{pC}}$$

La contribución a la eficiencia de la cámara de calentamiento es mantener el sistema adiabático es por ello que la cámara se construye de ladrillo refractario para evitar pérdidas y consta de:

- Cámara de ingreso de los gases.
- Cámara de calentamiento por donde circula el aire dentro de del tubo como muestra la figura 4.3.
- Cámara de transferencia, primaria y secundaria.



**Figura N° 4. 4.** Configuración del intercambiador de calor, vista transversa.

Las temperaturas de entrada del aire y de los gases de chimenea son medidas con la cámara termográfica y corresponden a las temperaturas de la chimenea por encima de la puerta de carga del cubilote y la de ingreso del aire por el ventilador. Las temperaturas pueden observarse de mejor forma en el siguiente diagrama.

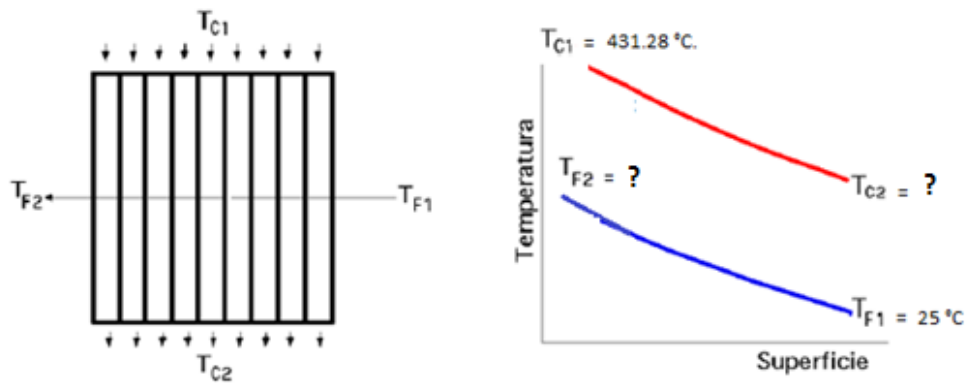


Figura N° 4. 5. Temperaturas consideradas para el dimensionamiento del intercambiador.

La cámara de calentamiento se construirá a 1.5 m del horno y sus dimensiones serán de 1.1 x 2.3 x 2.8 m. Su estructura será de ladrillo refractario con el objeto de producir un medio adiabático y evitar pérdidas por transferencia se unirá al horno de cubilote según se muestra a continuación:

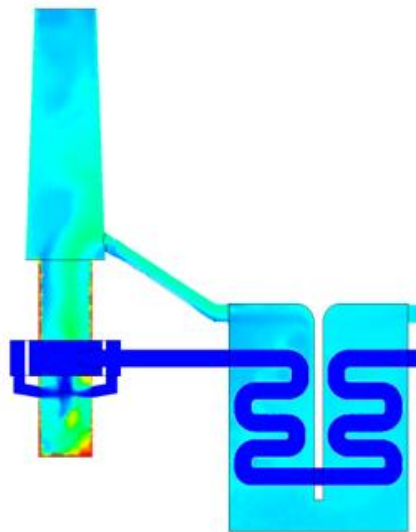


Figura N° 4. 6. Disposición de la cámara de calentamiento.

#### 4.5.4. Estimación del coeficiente global U de transmisión de calor.

Según (Gilberto, 2014) considera que para la estimación del U global es necesario tener el conocimiento de variables como:

- El espesor “e” del metal que separa al aire que ingresa al intercambiador o a través de la tubería metálica y los gases calientes de chimenea que ingresan al intercambiador en flujo cruzado.
- El coeficiente de conductividad K del material que separa ambos fluidos,
- Determinar los coeficientes individuales de transmisión de calor ( $h_c$  y  $h_f$ ) para el fluido caliente y frío, respectivamente.

A demás sugiere el uso de correlaciones empíricas para el cálculo del número de Nusselt que permitirán finalmente encontrar los coeficientes de convección de los fluidos frío y caliente.

El movimiento dinámico de ambos fluidos relaciona sus coeficientes con sus propiedades físicas de dichos fluidos. A continuación se muestran los valores calculados en la tabla 4.1.

#### 4.5.5. Determinación de los coeficientes de transferencia.

A continuación se muestra los valores obtenidos en el cálculo del coeficiente de transferencia global.

**Tabla N° 4. 1.** Valores de los parámetros y coeficientes de transferencia calculados para la cámara de calentamiento.

Fluido	$\dot{m}$ [Kg/s]	T [°C]	V [m/s]	Re	Nu	h [W/m <sup>2</sup> °C]	U <sub>Global</sub> [W/m <sup>2</sup> °C]
Aire	0.212	25	2.53	48602.2715	152	26.3	1.43
Gases de combustión	0.206	431.28	0.48	5775.4647	31.24	1.65	

#### 4.5.6. Determinación De la diferencia media logarítmica y la eficiencia de la cámara de calentamiento.

Una vez, determinado el U global del arreglo se procede al cálculo de la diferencia media logarítmica y la eficiencia de la cámara de calentamiento.

**Tabla N° 4. 2.** Valores encontrados de temperatura media logarítmica y la eficiencia de la cámara de calentamiento.

Área para una tubería de 300 mm de diámetro	0.0194	m <sup>2</sup>
U	1.43	W/m <sup>2</sup> °C
$\Delta T_{(LMTD)1}$	202.48	° C
Eficiencia	98.8	4.3

Con estos datos se procede a realizar una iteración con la ecuación (4.1) para seleccionar la longitud del tubo que pasara a través de la cámara de calentamiento por donde ingresara el aire frio.

La cámara de calentamiento se ajustará a la longitud del tubo encontrada. A continuación se muestran las iteraciones de las cuales se escogió la recuperación de un 8% de la energía.

**Tabla N° 4. 3.** Valores calculados de la temperatura media logarítmica y la eficiencia de la cámara de calentamiento.

ITERACIONES	% recuperación	Flujo de calor absorbido con la E 98.87%	L [m]	$\Delta T_{(LMTD)}$
5% de recuperación	5	33974,13	6.58	160,96
<b>8% de recuperación</b>	<b>8</b>	<b>54358,61</b>	<b>10.85</b>	<b>257,53</b>
10% de recuperación	10	67948,27	13.56	321,91
15% de recuperación	15	101922,40	20.34	482,87
25% de recuperación	25	169870,67	33.90	804,78

Al realizar las iteraciones para el caso del 8% de recuperación de la energía perdida se determina que la temperatura de ingreso al horno es de 150°C y la de salida al ambiente es de 260°C.

#### 4.5.7. Selección del extractor

Mientras mayor caudal se logre captar del gas de chimenea para precalentar el aire de combustión, mejores resultados se logran.



En la selección se consideró el flujo de salida de los gases de chimenea estequiométrico de  $1\,525.52\text{ m}^3/\text{h}$ , la toma del gas de combustión estará ubicada unos 20 cm de la puerta de carga cuyos temperatura alcanza los  $432.28^\circ\text{C}$ . Para este caudal se encontró en la Fig. N° 4.7 el ventilador del modelo Y5-47 resistente al calor de los gases de chimenea, además cuenta con impulsión de correa y la unidad de acoplamiento. La figura siguiente muestra sus características

	Potencia del motor (kw)	Velocidad de rotación (r/min)	Caudal de aire ( $\text{m}^3/\text{h}$ )	Presión total (Pa)
C 3,15	1.5	3250	1323-2496	1049-716
	1.5	2990	1218-2297	883-608
	1.5	2750	1120-2112	745-520
4C	4	3300	2751-5190	1922-1393
	3	2900	2417-4561	1481-1079

**Figura N° 4. 7.** Parámetros para la selección de la potencia del extractor

**Fuente:** <http://www.jn-fans.com/centrifugal-fan/centrifugal-fan-for-power-station-and-boiler/y5-47-belt-drive-heat-resistant-boiler.htm>

#### 4.6. Simulación

Para la simulación se requirió de un modelado, y de los cálculos teóricos realizados para el horno de cubilote actual con sus parámetros operacionales.

El proceso de simulación de cubilote se lo realizó con parámetros tomados en el horno de la Empresa Centro Mecanizado Pérez de la ciudad de Ambato. En la figura 3.1 se halla un esquema con las dimensiones del horno.

En este trabajo se comienza simulando:

- El cubilote actual
- La cámara de calentamiento de los gases
- El prototipo mejorado

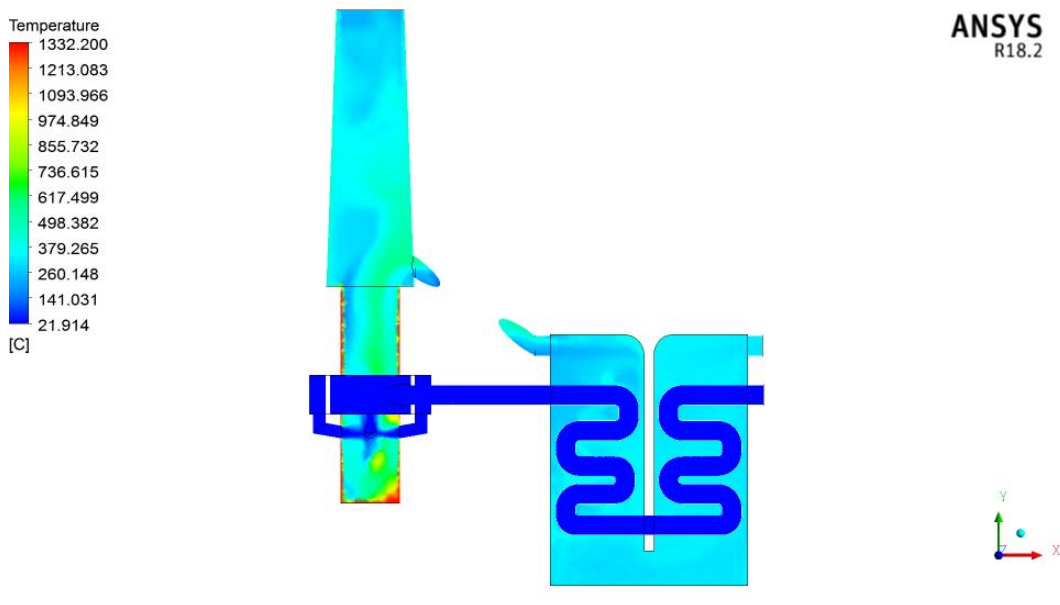
#### 4.6.1. Simulación de los hornos de cubilote actual

Los datos tomados en la empresa fueron procesados para la determinación de la energía requerida por el cubilote actual, luego de los cálculos se presentan los valores relevantes en la tabla siguiente:

**Tabla N° 4. 4.** Valores de los calores y eficiencias para el cubilote actual

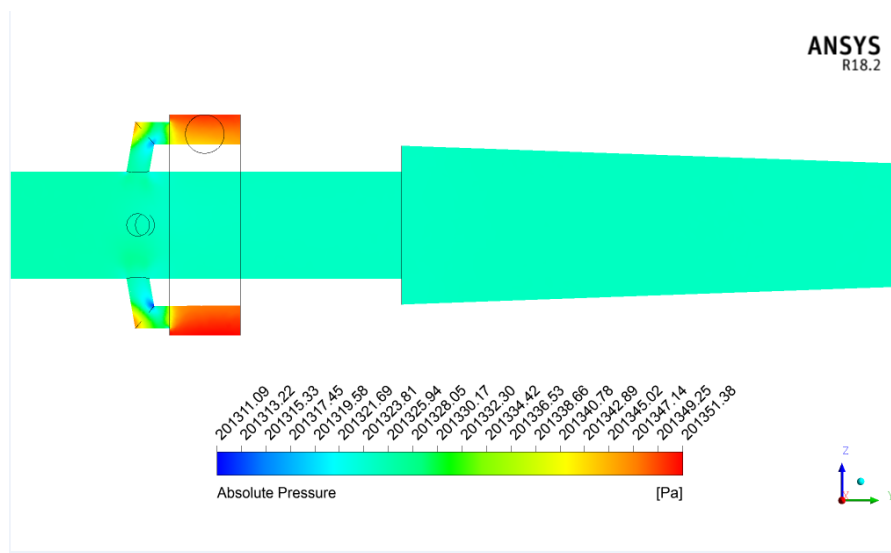
Calor presente en el hierro a la temperatura de colada	203 000.00 kcal
Calor total suministrado	600 331.62 kcal
Calor de oxidación	6 813.93 kcal
Calor absorbido de los gases de escape	180 951.77 kcal
Calor potencial del coque	586 159.99 kcal
Eficiencia de fusión	33.43%
Eficiencia de combustión	69.13%

Estos datos permitieron simular el comportamiento del cubilote a las condiciones actuales. Uno de los resultados de la simulación es el comportamiento frente a los cambios de temperaturas, las temperaturas oscilan entre 22 °C a 1 332 °C. La temperatura más alta para este proceso sin precalentamiento es de 1332.2 °C



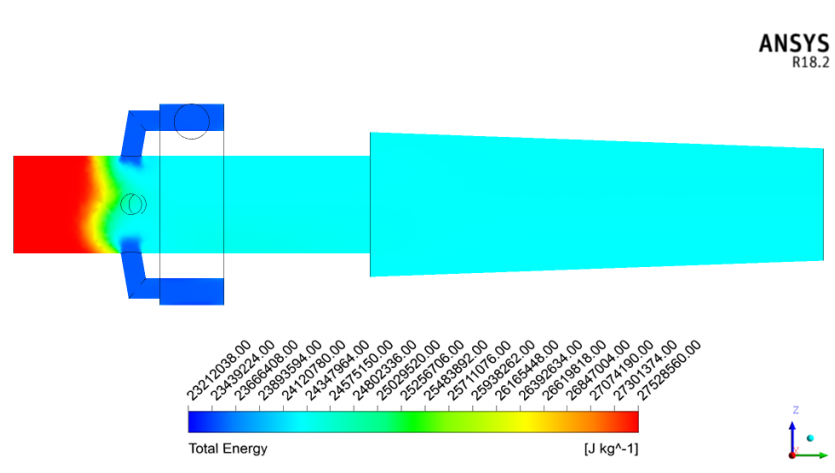
**Figura N° 4. 8.** Simulación de la temperatura del horno en ausencia de aire precalentado.

En la siguiente figura se puede observar que el proceso de fundición se realiza a presión constante, salvando la posición de la cámara de viento donde el aire ingresa con fuerza, una vez superado este paso el aire circula por las toberas el aumento de la presión es imperceptible, como se puede observar en la figura No.4.9



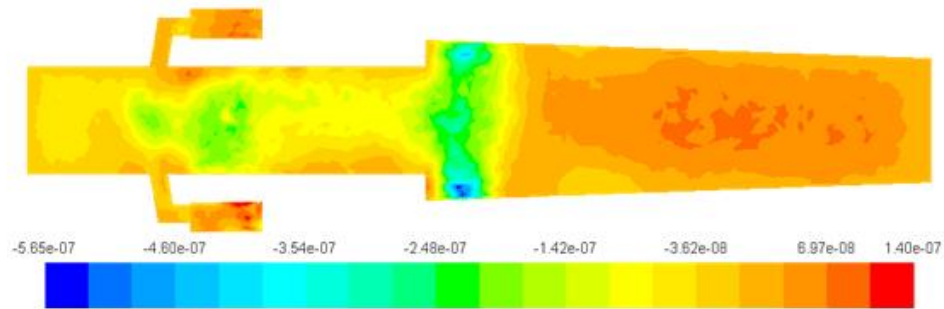
**Figura N° 4. 9.** Simulación de presiones en el horno de cubilote en ausencia de aire precalentado.

La simulación del horno actual, para la determinación de la energía total requerida para la fusión de 625 Kg de hierro con 94 kg de coque del 82% en peso, generó valores que oscilan entre 2321203, 8 kJ y 2752856.0 kJ, a continuación se observa los resultados obtenidos representado en la figura. No. 4.10



**Figura N° 4. 10.** Simulación de la energía total para la fusión de 625 kg. de hierro en ausencia de aire precalentado.

De igual manera se ha podido simular el porcentaje de material no combustionado en el cubilote actual, donde se muestra que este material está concentrado en la chimenea en los gases de salida.

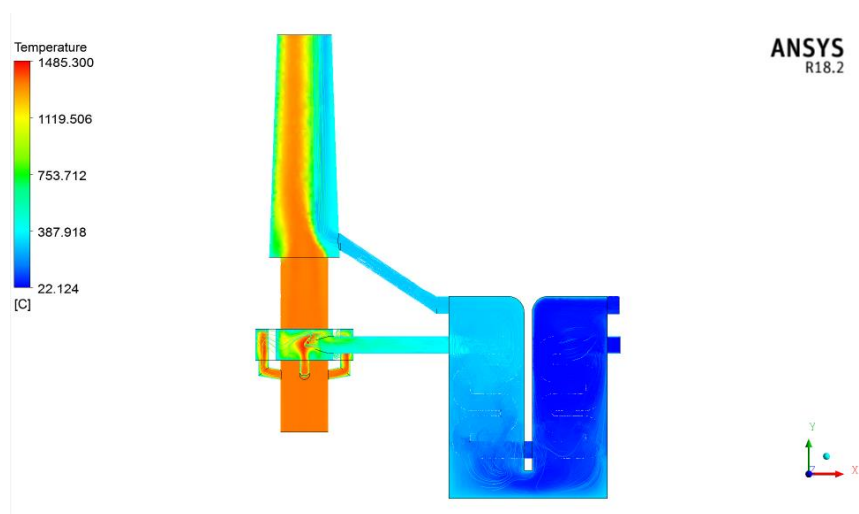


**Figura N° 4. 11.** Simulación de ppm de material no combustionado en el cubilote en ausencia de aire precalentado.

#### 4.6.2. Simulación de la cámara de calentamiento y el prototipo mejorado

Como se puede observar en la figura No. 4.11 la cámara de calentamiento empieza a realizar la transferencia entre los dos fluidos. Así el aire ingresa aproximadamente a 25 °C. Mientras que los gases de combustión tendrán un promedio entre los 387.91°C y los 753.71 °C, en tanto que los gases de escape salen a un promedio entre 150- 200°C.

La temperatura más alta en el horno con aire precalentado a 228.32°C alcanza los 1485 °C, esto supone una mejora



**Figura N° 4. 12.** Simulación de las temperaturas del prototipo con la cámara de calentamiento.

La simulación muestra que el proceso de fundición es a presión constante, se muestra pequeños aumentos en puntos curvos como el ingreso del aire en el intercambiador y la salida del aire de la cámara de viento por las toberas

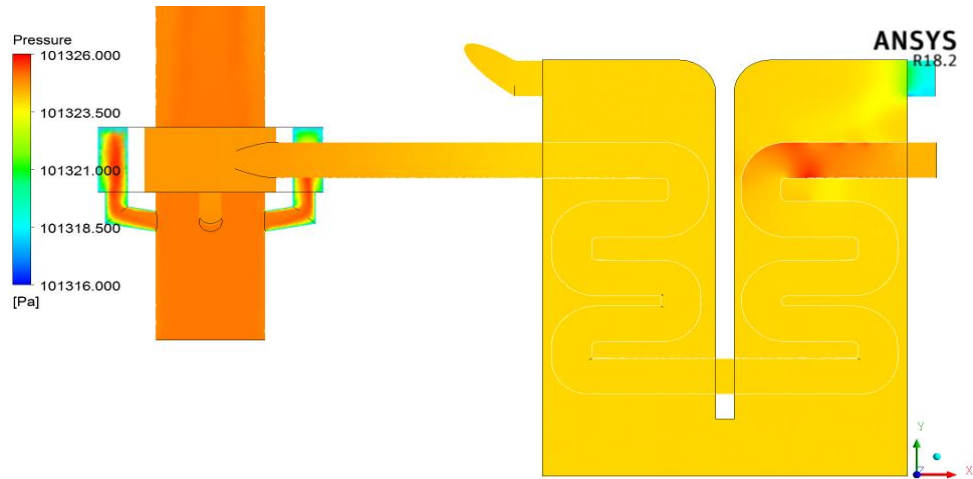


Figura N° 4. 13. Simulación de las presiones en el prototipo del horno mejorado.

La simulación del prototipo con aire precalentado a 228.32°C muestra un valor máximo de 2 532 627.6 kJ para la fundición de los 625 kg de hierro.

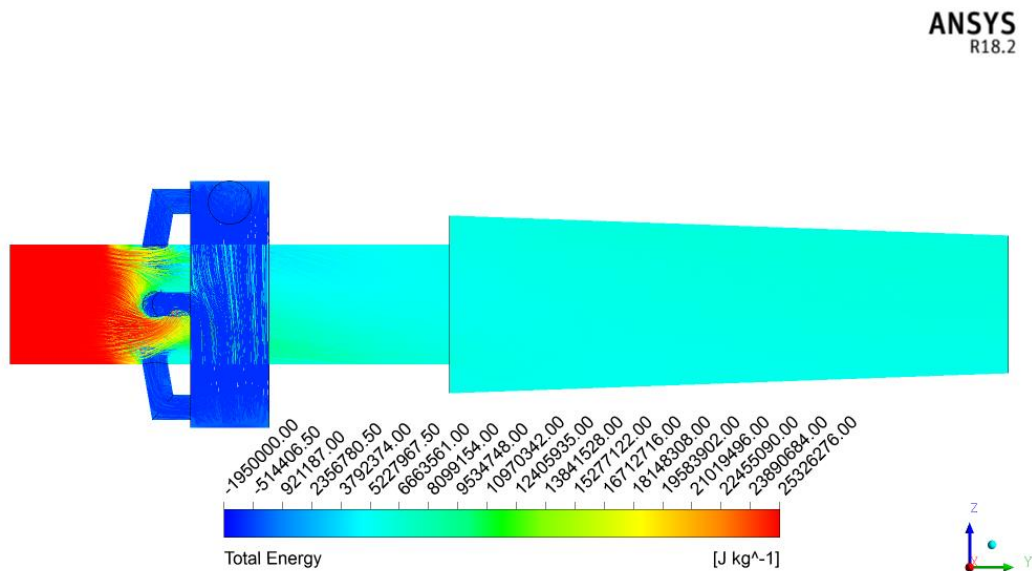


Figura N° 4. 14. Simulación de los cambio térmicos del prototipo con precalentamiento del aire.

La tabla a continuación presenta los índices relevantes que resumen la potencia térmica de cada uno de los hornos con o sin precalentamiento.

#### 4.6.3. Comparación de los hornos de cubilote actual con la mejora

En la tabla No. 4.5 se establece el resumen de los valores obtenidos por la investigación a través de cálculos energéticos y la simulación.

**Tabla N° 4. 5.** Valores de energía que arroja la simulación

<b>CUBILOTES</b>	<b>ENERGÍA TOTAL [KJ]</b>	<b>Eficiencia de fusión [%]</b>	<b>Eficiencia de combustión [%]</b>	<b>Índice [kcal/kg c]</b>
CUBILOTE A	2 509 386.173	33.43	69.13	6 386.50
CUBILOTE B	2 459 198.448	39.18	78.18	6 897.42

Adicionalmente la tabla muestra el índice de funcionamiento del horno actual y el de la mejora, en este caso se obtiene una mejora del 8% con respecto al horno de cubilote actual. El ingreso del aire caliente al horno mejorará en 2 puntos la eficiencia de combustión. Este hecho permite un aumento en la eficiencia de fusión de 33.43 a 39.18%.

La propuesta reduce en un 8% la energía consumida esto constituye un ahorro de 510 kcal/ kg C.

Estos datos indican que se puede fundir más hierro con igual cantidad de coque, provocando una disminución en el tiempo de operación del horno, o lo que es lo mismo aprovechando el recurso humano, se podrá hacer más paradas en el mismo tiempo. Esta consideración traerá ganancias sustanciales a la empresa.

Al considerar una relación lineal entre la temperatura y el tiempo y conociendo que cada parada requiere entre 30 y 40 min; se afirma que en el prototipo existirá una disminución casi de 10 min por parada, que en el día de fundición podrá hacerse al menos una parada adicional.

De los datos proporcionados por la simulación CFD se logra concluir que el cubilote B presenta una mejora en su energía total (J/Kg) del 8%.

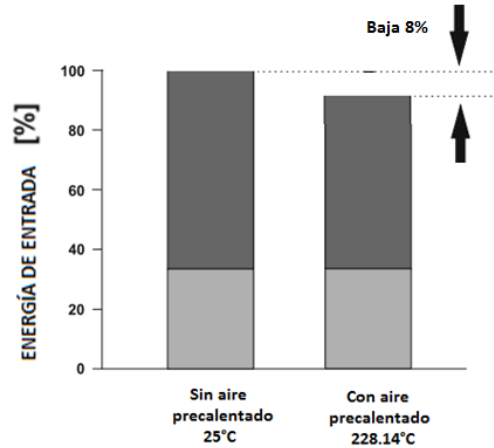


Figura N° 4. 15. Comparación de la energía en porcentaje de los cubilotes actual y mejorado.

#### 4.7. Valoración económica de la propuesta.

Luego de culminar el análisis de factibilidad técnica de la propuesta de recuperación de los gases de chimenea se realiza el estudio de la factibilidad económica del mismo, con el cual se demostrará que el cambio técnico es económicamente factible. La tabla No. 4.6 contiene el detalle de los requerimientos para la implementación de la propuesta.

Tabla N° 4. 6. Costos de los materiales para la implementación de la cámara de calentamiento.

Detalle	Cantidad	Costo unitario	Costo
Ventilador centrífugo de caldera de serie Y5-47, de 1.5 Kw	1	2000.00	2000.00
Tubo estructural redondo de 10" y 3 mm de espesor	20 m	50.00	1000.00
Neplos	4	25.00	100.00
Instalación de cámara y puesta en marcha	1	3000.00	3000.00
<b>Total</b>			<b>6100.00</b>

El análisis económico comienza un breve análisis de la empresa sin el proyecto, en el cual se consideran los costos de gastos necesarios para el proceso, así como los ingresos por la venta del producto. La tabla No. 4.7 muestra dichos rubros al igual que los flujos futuros esperados en 10 años.

**Tabla N° 4. 7.** Costos, ingresos y flujos de caja de la empresa Centro Mecanizado Pérez sin proyecto.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANT/AÑO (TN)	COSTO /TN \$/TN	COSTO ANUAL
<b>MATERIA PRIMA</b>				
chatarra	Tn.	120	140,00	16800,00
Coque	Tn.	24	800,00	19200,00
caliza	Tn.	6	100,00	600,00
<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>				
Ventilador 15 HP				238,14
Elevador 3HP				49,57
Mantenimiento del horno			400,00	4800,00
Penalización			3000,00	3000,00
<b>MANO DE OBRA</b>				
Obreros		4	6000,00	24000,00
Gerente		1	10000,00	10000,00
Contadora		1	6000,00	6000,00
<b>COSTO TOTAL</b>				<b>84687,71</b>
<b>INGRESOS</b>		<b>120</b>	<b>1560,00</b>	<b>187200,00</b>

	AÑO	AÑO	AÑO	AÑO		AÑO	AÑO
INVERSIÓN	0	1	2	3		9	10
COSTO TOTAL		84687,71	84687,71	84687,71	.....	84687,71	84687,71
INGRESO TOTAL		187200,00	187200,00	187200,00	.....	187200,00	187200,00
UTILIDADES ANTES DE IMPUESTOS		102512,29	102512,29	102512,29	.....	102512,29	102512,29
IMPUESTOS Y REPARTICIÓN DE UTILIDADES		25628,07	25628,07	25628,07	.....	25628,07	25628,07
UTILIDADES DESPUÉS DE IMPUESTOS		76884,22	76884,22	76884,22	.....	76884,22	76884,22

Las utilidades después de impuestos arrojan valores de \$76 884.22 anuales, siendo la empresa rentable y susceptible de invertir en la “propuesta de mejora”, dichos rubros se detallan en la tabla No. 4.8

**Tabla N° 4. 8.** Costos y depreciación de los equipos para la implementación de la propuesta.

CONCEPTO		COSTO		TIEMPO DE VIDA	DEPRECIACIÓN ANUAL	COSTO RESIDUAL
Tubería	20	50	1000	10	80,00	200
neplos	4	25	100	10	10,00	0
ventilador	1	2000	3000	10	275,00	250
construcción	1	3000	2000			
INVERSIÓN			6100			
DEPRECIACION ANUAL					365,00	450



La implementación a realizar al horno de cubilote es adicionar una cámara de calentamiento cuyo costo asciende a los \$6 100,00 tendrá una vida útil de 10 años. Con un valor de salvamento de \$450,00.

El ahorro energético que se obtiene con la propuesta es de 54,97 kJ/s, aproximadamente que relacionado con el poder calorífico del coque, se tiene un ahorro de 47,18 kg de coque por quemada, lo que representa al mes una ganancia de 188,72 kg/mes; y considerando el costo del coque de 0,85\$/kg se obtiene una ganancia de \$150,97/mes. En la tabla No. 4.7 se muestran los rubros de costos e ingresos.

**Tabla N° 4. 9.** Costos totales e ingresos de la Empresa Centro Mecanizado Pérez con proyecto.

DESCRIPCIÓN	UNIDAD	CANTIDAD	VALOR U.	COSTO
<b>MATERIA PRIMA</b>				
chatarra	Tn.	120	140	16800
Coque	Tn.	24	800	19200
Ahorro de coque	Tn.	2,26	-800	-1808
caliza	Tn.	6	100	600
<b>COSTOS DE OPERACIÓN</b>				
Ventilador 15 HP				238,14
Elebador 3HP				49,57
Mantenimiento del horno		400		4800
Mantenimiento del cámara de calentamiento		50		600
Ventilador				72
Penalización			3000	3000
<b>MANO DE OBRA</b>				
Obreros		4	6000	24000
Gerente		1	10000	10000
Secretaria		1	6000	6000
<b>COSTO TOTAL</b>				83551,71
<b>INGRESOS</b>	Tn.	120	1560,00	187200,00

Los gastos de operación del sistema es el consumo de energía eléctrica del ventilador que considerando su potencia de 1.5 kW, el rendimiento del 80% costo de \$0,1/ kW-h y las 8 h de trabajo/día producen un costo de \$6/mes, de igual manera se requerirá de un mantenimiento de la cámara de calentamiento (limpieza del hogar).

A continuación se muestra este análisis en el flujo de caja anuales de la empresa Centro Mecanizado Pérez por la inversión realizada, a una tasa de interés del 7,63%.

**Tabla N° 4. 10.** Flujos de caja anuales con proyecto de mejora

	A 0	A 1	A 2	A 3	.....	A 9	A 10
INVERSIÓN	-6100	0					
COSTO TOTAL		83551,71	83551,71	83551,71	.....	83551,71	83551,71
INGRESO TOTAL		187200,00	187200,00	187200,00	.....	187200,00	187200,00
DEPRECIACIÓN		365,00	365,00	365,00	.....	365,00	365,00
UAI		103283,29	103283,29	103283,29	.....	103283,29	103283,29
IMPUESTOS Y REPARTICIÓN		25820,82	25820,82	25820,82	.....	25820,82	25820,82
UDI		77462,47	77462,47	77462,47	.....	77462,47	77462,47
DEPRECIACIÓN		365,00	365,00	365,00	.....	365,00	365,00
VALOR DE SALVAMENTO							450,00
UTILIDAD NETA	-6100	77827,47	77827,47	77827,47	.....	77827,47	78277,47

Las utilidades anuales después de impuestos da un valor de \$77 827,47 algo superior a la utilidad sin el proyecto, aunque es un valor mínimo económicamente se trata de mejorar energéticamente.

Para determinar la factibilidad de la implementación de la propuesta se realizó la comparación de los dos flujos de caja como se muestra en la tabla No. 4.11

**Tabla N° 4. 11.** Diferencia de Flujos de caja anuales con y sin proyecto de mejora

Años	A 1	A 2	A 3	.....	A 9	A 10
Flujo de fondos sin proyecto	76884,22	76884,22	76884,22	.....	76884,22	76884,22
Flujo de fondos con proyecto	77827,47	77827,47	77827,47	.....	77827,47	78277,47
Diferencia de flujos	943,25	943,25	943,25	.....	943,25	1393,25

Se obtiene una diferencia positiva y con ello se obtiene los índices económicos como se muestra en la tabla No. 4.12

**Tabla N° 4. 12.** Índices financieros del proyecto de mejora

VPN	\$ 512,87
TIR	10%
PERIODO SIMPLE DE RECUPERACIÓN DE LA INVERSIÓN	9,5
Rb/c	1,04

Para el cálculo del valor actual neto (VAN) se utilizó una tasa de interés del 7.63% para inversión pública según (Circular de tasas de interes GF-006-2018), lo que arrojó un valor positivo y en el caso de la tasa interna de retorno (TIR) su valor es 10% por lo que se lo considera un proyecto factible de realizarlo.

#### 4.8. Estudio ambiental.

El prototipo modelado y simulado no solo indica una mejora en el rendimiento de fusión del horno de cubilote sino en la reducción de las ppm de carbono no combustionado. A continuación se analizará las emisiones que se producen actualmente con un consumo de 18 402.52 kg de coque al año según la tabla No.4.13 y las que se producirían con el prototipo.

**Tabla N° 4. 13.** Cálculo automático de emisiones totales en relación a los consumos energéticos.

Combustible	Consumo anual	Unidades de medida física	Factor de conversión	kWh	Factor de emisión (Kg de CO2 eq/kWh)	Kg de CO2 eq
Gas natural		Nm3	10,7056 kWh/Nm3	0	0,2016	0
Gasóleo		litros	10,6 kWh/l		0,2628	
Gasóleo		litros	10,6 kWh/l		0,2628	
Fuel		Kg	11,1611 kWh/Kg	0	0,2736	0
GLP Genérico		Kg	12,6389 kWh/Kg	0	0,234	0
Carbón nacional		Kg	5,6972 kWh/Kg	0	0,4032	0
ACTUAL Carbón importa	18 042,72	Kg	7,0917 kWh/Kg	127 953,55	0,3564	45 602,64
PROTOTIPO Carbón importa	17 501,44	Kg	7,0917 kWh/Kg	124 114,95	0,3564	44 234,57
Gas butano		Nº de bombonas o Kg	12,4389 kWh/Kg	0	0,2383	0

**Fuente:** (www.camarazaragoza.com)

Según (www.camarazaragoza.com) un kilo de coque genera 2,53 kg de CO<sub>2</sub>, en el caso del sistema actual se utiliza 94.0 kg/h en promedio, es decir cada hora se genera 237.58 kg de CO<sub>2</sub>, al año se generan 45 602.64 kg de CO<sub>2</sub>, con el prototipo y funcionando con los mismos parámetros de carga y tiempos se produciría 44 234.57 kg de CO<sub>2</sub> produciéndose una disminución de 3% de gases contaminantes.

#### **4.9. Conclusiones del capítulo**

- De acuerdo a los datos obtenidos por cálculos energéticos y la simulación realizada a la mejora tecnológica se verifica que este último sistema aumenta su eficiencia, produciendo un aprovechamiento de la energía perdida, por lo cual se concluye que el sistema de calentamiento del aire mejor la eficiencia.
- La mejora de la eficiencia térmica se hace efectiva con la propuesta de reformas técnicas al horno, esto es, usar los gases de combustión para calentar el aire de ingreso a la cámara de viento, mediante el intercambiador de calor.
- Se produce un ahorro del 8% en energía total consumida, esto quiere decir que se puede fundir aproximadamente unos 150 kg adicionales en las 8 h de trabajo.
- Se analizó el costo de la implementación del sistema de precalentamiento mediante una inversión al 7.63% de interés arrojando resultados positivos.
- El precalentamiento del aire de combustión ayuda a mejorar la eficiencia del horno. La energía recuperada produce un ahorro en el consumo de coque para la fundición de una igual cantidad de hierro fundido.

## CONCLUSIONES GENERALES

- ✓ El análisis bibliográfico realizado indica que existen múltiples posibilidades de mejoras en la eficiencia térmica del horno de cubilote, tales como calentamiento del combustible o comburente, inyección de oxígeno o uso de plasma, estas dos últimas alternativas traen consigo dificultades para la empresa por la falta de entidades que provean el suministro (oxígeno puro o plasma) y altos costes.
- ✓ El método de energías fue utilizado para la determinación de la eficiencia del horno actual y fue verificado con la simulación del Software de Ansys, de igual forma se verificó el funcionamiento de la cámara de calentamiento.
- ✓ Los índices financieros de VAN \$512.87 y TIR 10%, indican que el proyecto es factible aunque el tiempo de recuperación es 9 años.
- ✓ La relación de beneficio/costo es superior a 1, que demuestra que es favorable, para su cálculo se consideró el costo de reducción del CO<sub>2</sub>.
- ✓ La mejora del horno de cubilote no solo produce una disminución del 8% en el gasto total de energía consumida, además disminuye la polución de partículas que salen por la chimenea, pues al ser succionadas por el extractor quedan atrapadas en la cámara de calentamiento del aire.

## **RECOMENDACIONES**

- Mientras más largo sea el paso del aire en la cámara de calentamiento mayor será la temperatura que se alcance, lo que indica que se debería investigar la posibilidad de captar todo los gases de chimenea y hacerlos pasar por dos cámaras, esto supondría mayor eficiencia.
- Se debería plantear un cambio de tecnología al horno de cubilote que es esencialmente contaminante por el de inducción que trae, según la literatura muchas más prestaciones, como menor contaminación, mayor rendimiento térmico y mayor temperatura de colada con características del hierro mejorada como el hierro nodular.
- La simulación es un método semi-experimental que se debe fomentar en todas las investigaciones de este tipo.

## **ANEXOS**

## ANEXO A: CÁMARA TERMOGRÁFICA DE FLUKE

### Instrumentos de medición de temperatura

#### Cámaras termográficas de Fluke

##### Serie Performance: Cámara termográfica de altas prestaciones de 320 x 240 con enfoque manual TiS75

Imágenes de calidad profesional con funciones que le ayudan a detectar y resolver el problema de un modo rápido y sencillo.

- Imágenes de calidad de 320 x 240 con enfoque manual, obtenga imágenes óptimas a partir de solo 0,15 m (6 pulgadas)
- Vea la ubicación del problema gracias a la tecnología patentada IR-Fusion®, que combina imágenes infrarrojas y de luz visible con la cámara de 5 MP
- Tome decisiones en tiempo real; sincronice imágenes de forma inalámbrica desde su cámara, genere y envíe por correo electrónico informes con su smartphone y la app Fluke Connect®
- Conéctese de forma inalámbrica con otros instrumentos compatibles con Fluke Connect<sup>1</sup>
- Tarjeta micro SD extraíble de 4 GB
- Anotaciones de voz
- Batería inteligente con indicador LED de carga



#### Especificaciones

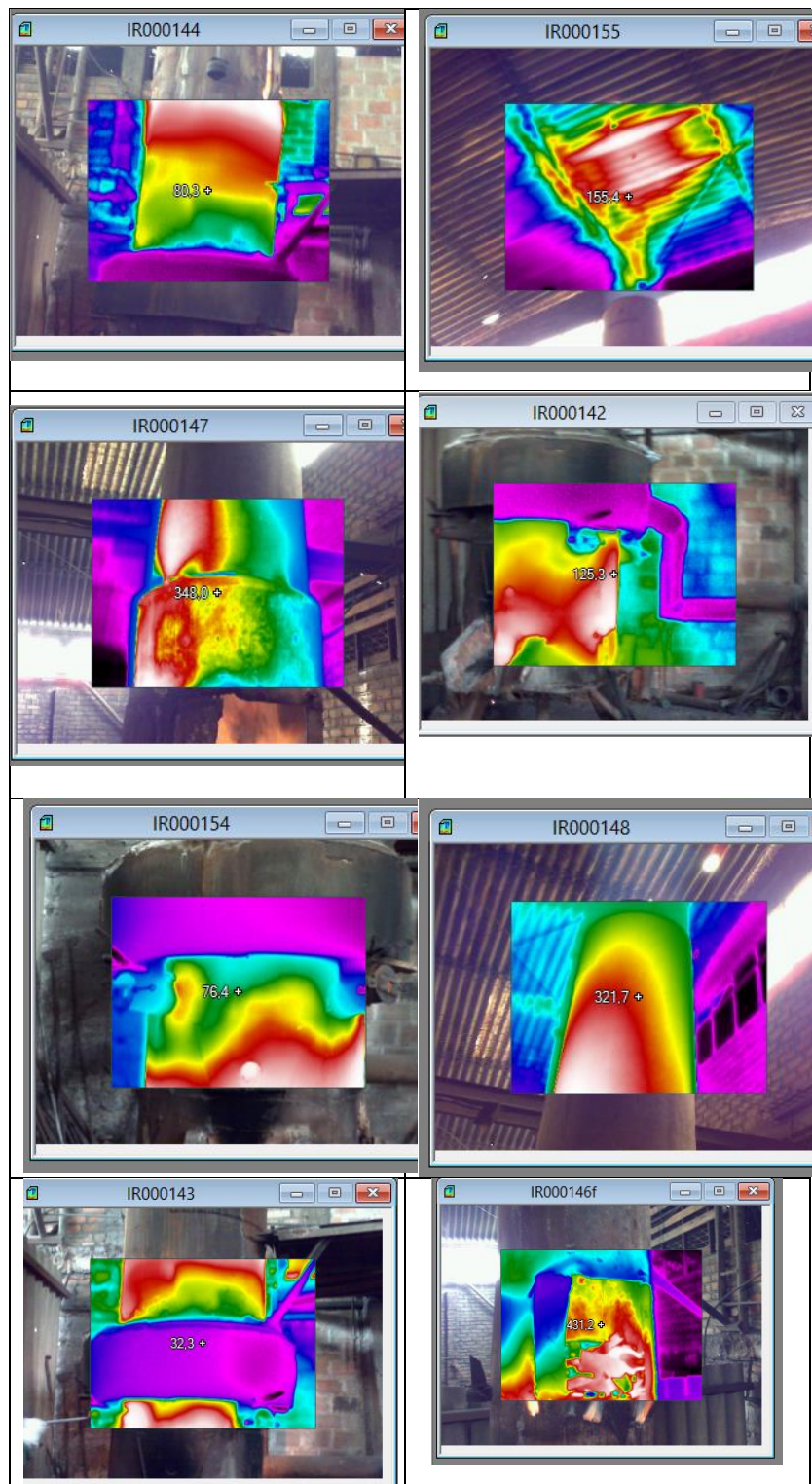
	TIx500	Ti450	TiS75
Resolución del detector	320 x 240 modo de super resolución de 640 x 480		320 x 240
Resolución espacial (IFOV)	1,31 mrad		2,0 mrad
Campo de visión	24 °H x 17 °V		35,7 °H x 26,8 °V
Sistema de enfoque	Enfoque MultiSharp™ y autofocus LaserSharp® con medidor láser de distancia integrado y enfoque manual avanzado		Enfoque manual
Conectividad inalámbrica	Compatible con la app Fluke Connect		
Tecnología IR-Fusion	Sí, imágenes infrarrojas y de luz visible combinadas		
Pantalla	LCD táctil de 5,7 pulgadas	LCD táctil de 3,5"	Pantalla LCD de 3,5"
Diseño	Diseño FlexCam ergonómico con una lente articulada de 240 grados	Diseño ergonómico y resistente, apto para su uso con una sola mano	Diseño ergonómico, ligero y resistente para su uso con una sola mano
Rango de medida de temperatura	-20 °C a +650 °C (de -4 °F a +1202 °F)	-20 °C a +1200 °C (-4 °F a +2192 °F)	-20 °C a +550 °C (-4 °F a +1022 °F)
Sensibilidad térmica	≤ 0,05 °C a una temp. del objetivo de 30 °C (50 mK)	≤ 0,05 °C a una temp. del objetivo de 30 °C (50 mK) Modo de filtro: ≤ 0,03 °C a una temp. del objetivo de 30 °C (30 mK)	≤ 0,08 °C a una temp. del objetivo de 30 °C (80 mK)



Solución de problemas de primer nivel a 320 x 240.

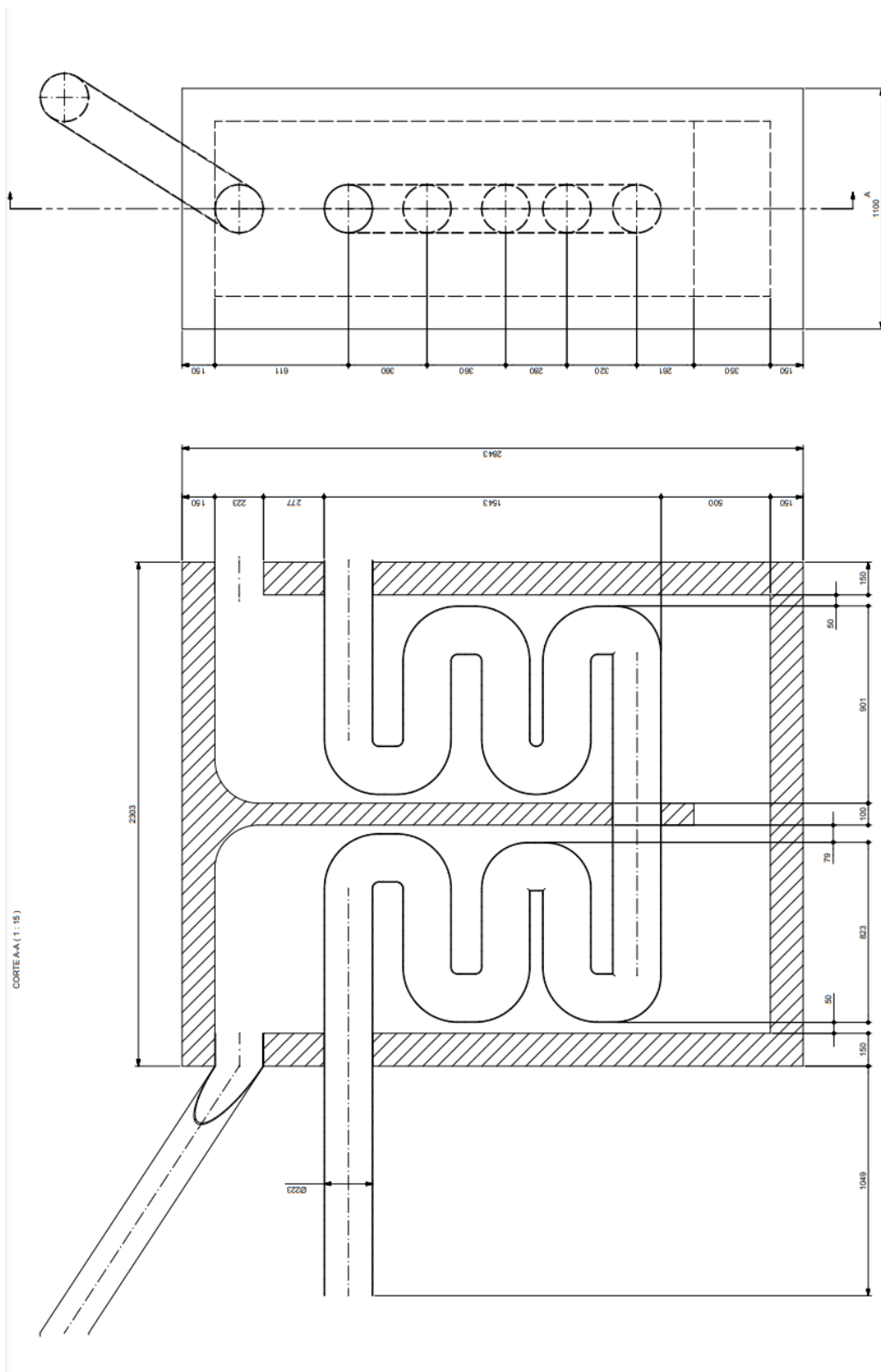


## ANEXO B: DATOS DE TEMPERATURA TOMADOS [°C] CON LA CÁMARA TERMÓGRÁFICA FLUKE



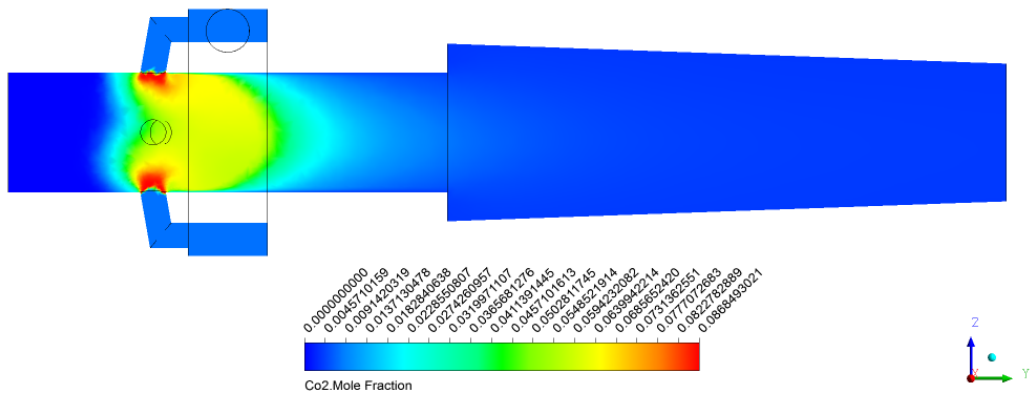
Fuente: trabajo de campo

# ANEXO C: PLANO DE LA CÁMARA DE CALENTAMIENTO

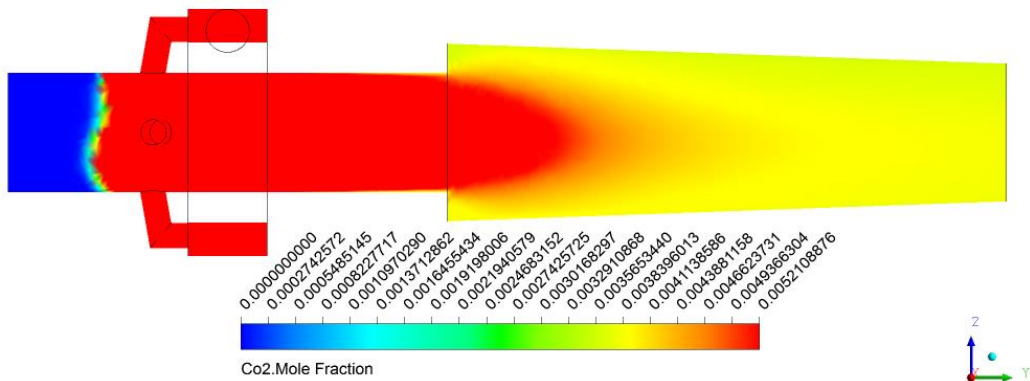


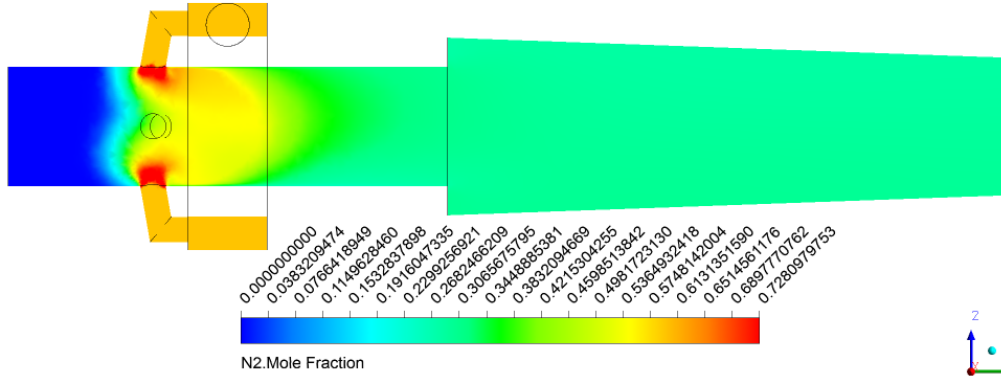
# ANEXO D: VARIAS SIMULACIONES DEL HONO DE CUBILOTE ACTUAL Y MEJORADO

ANSYS  
R18.2



ANSYS  
R18.2





## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

### BIBLIOGRAFÍA

- Acevedo, L. (agosto 2011). Modelo de fundición de aluminio mediante plasma, Tesis de maestría , Universidad de Zaragoza.
- Alfateclimin. (2007). *Tecnologías Limpias en la Industria Minero-Metalúrgica. Marco Legal - América Latina*,. Recuperado el febrero de 2016, de [http://www.tecnologiaslimpias.cl/ecuador/ecuador\\_mamb.html](http://www.tecnologiaslimpias.cl/ecuador/ecuador_mamb.html).
- Arias, F. G. (2006). *Introducción a la metodología científica*. Caracas-Venezuela: Ediciones Fundación para la cultura.
- Aristizábal Sierra, R. E. (julio de 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 N.º 37*, 176-187.
- Aristizábal, R. (2006). Simulación del proceso de fusión . *Facultad de Ingeniería No. 37*, 176-187.
- Aristizábal, R. C. (2004). *Modelo matemático para un horno de cubilote*. (U. d. Antioquia., Ed.) Medellin.
- Autor: Moreno Cadenas, J. G. (2014). Rediseño y calculo de un intercambiador de calor para un ciclo de trigeneración en la. *Tesis*.
- Baquero, A. A. (2000). *Diseño, operación y control del cubilote* (1.ª ed ed.). Bucaramanga: UIS.
- BOTERO, F. 2.-h. (2012). Obtenido de [http://www.metalactual.com/revista/20/maquinaria\\_hornos.pdf](http://www.metalactual.com/revista/20/maquinaria_hornos.pdf)
- Botero, F. (s.f.). Hornos de inducción . 27.
- Cacua, K.; Amell, A. y Cadavid, F. (2012, vol. 45). Effects of oxygen enriched air on the operation and performance of a diesel-biogas dual fuel engine. 159-167.
- Cengel, Y. (2007). *Transferencia de calor y masa*. Nevada: McGraw Hill.
- Circular de tasas de interes GF-006-2018*. (s.f.). Obtenido de periodo junio 2018: <https://www.banecuador.fin.ec/tasas-de-interes/>
- FERNÁNDEZ RIVERA, C. A. . (2009). Análisis de consumos energéticos: caso empresa Gerdau Aza S.A. . *Universidad de Santiago de Chile* .
- Fuller, B. D. (1923). *El horno de cubilote y sus operaciones* . Schaumburg: American Foundrymen's Society, .

- Gilberto, M. C. (2014). *Rediseño y cálculo de un intercambiador de calor para un ciclo de trigeneración*. Obtenido de [www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4189](http://www.ptolomeo.unam.mx:8080/xmlui/handle/132.248.52.100/4189)
- Giro, I. E. (s.f.). *deducciones y transformaciones* .
- GOLÓN VALENZUELA, M. G. (2009). *Diseño de un recuperador de calor para el horno tipo cubilote del taller de fundición , j.a. Ramírez*. Obtenido de [http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08\\_0594\\_M.pdf](http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0594_M.pdf)
- Golón, M. (2009). *DISEÑO DE UN RECUPERADOR DE CALOR PARA EL HORNO* .  
<https://contenido.bce.fin.ec>. (01 de 03 de 2018). Recuperado el 03 de 03 de 2018
- Incropera, F. P. (1999). *Fundamentos de transferencia de calor* . Mexico: Pearson.
- Kulkarni, P. (2013). *Policies and Strategies for the Improvement in Energy Efficiency in Industries. Indian Experience. International Journal of Recent Technology and Engineering (IJRTE)*.
- Lee., D. (2003). *Exergy Analysis and efficiency evaluation for an aluminum melting furnace in a die casting plant*. . PhD thesis, Ryerson University.
- NACIONAL2008, A. (20 de 10 de 2008). Obtenido de CONSTITUCION DE LA REPUBLICA DEL ECUADOR 2008 Norma: Decreto Legislativo # 0 Status: Vigente Publicado: Registro Oficial # 449: [www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4\\_ecu\\_const.pdf](http://www.oas.org/juridico/pdfs/mesicic4_ecu_const.pdf)
- Panama, M. (05 de 03 de 2015). *Deducciones y transformaciones*. Recuperado el 2016, de <http://es.slideshare.net/Lauuzz1122/deducciones-y-demostraciones-transferencia-de-calor>
- Pintado, F. (1952). *Boletín informativo del instituto nacional del carbón*. Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/52182/1/Coque%20Sider%3%BArgico.%201.%20Definici%C3%B3n%20y%20propiedades.pdf>.
- PINTADO, F. (1952). *Boletín informativo del instituto nacional del carbón*. . Obtenido de <http://digital.csic.es/bitstream/10261/52182/1/Coque%20Sider%3%BArgico.%201.%20Definici%C3%B3n%20y%20propiedades.pdf>
- Ramos, R. A., Abel, B., & Guerra Reyes, Y. p. (2007). *Metodología para evaluar los hornos de cubilote*. Argentina: El Cid Editor - Ingeniería.
- Rivera, P. (1998). Marco Teórico, elemento fundamental en el proceso de investigación científica. *Tip: tópicos de investigación y postgrado*.
- Rolle, K. C. (2006). *Termodinámica* . Mexico: Pearson .

Sierra, A. (marzo de 2006). Modelo matemático para los fenómenos de combustión en un horno de cubilote. *Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*, 71.

Society, A. F. (1977). *El horno de cubilote y su operación*. México: Colonial.

[www.camarazaragoza.com](http://www.camarazaragoza.com). (s.f.). Recuperado el 10 de 02 de 2018

Zhou, J.; Foucher, F.; Persis, S. & Pillier, L. (2011). Effect of oxygen enrichment and CO<sub>2</sub> dilution on laminar methane. *European Combustion Meeting Cardiff: Royaume-Uni*.