

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-27

Auditoria energética de los hornos de fundición de la empresa FINSA

Wbeimar Alonso Florez Rodriguez

Ingeniería electromecánica

Asesor
Luis Fernando Cardona Sepúlveda

INSTITUTO TECNOLÓGICO METROPOLITANO

2017

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RESUMEN

La empresa FINSA realiza el proceso de fundición de chatarra de hierro gris por medio de dos hornos, para darle diferentes formas y reuso a la chatarra. Estos hornos usan diferentes fuentes energéticas: el horno cubilote utiliza carbón coque, el cual es barato y contaminante, mientras que el horno de inducción utiliza electricidad, la cual es más limpia que el carbón, aunque más costosa. En este trabajo se propone una auditoría energética del horno de inducción y del horno cubilote, para evaluar la eficiencia energética, los consumos específicos de energía y el impacto ambiental de ambos equipos, con el fin de determinar la mejor manera en la que se pueden operar ambos hornos desde el punto de vista económico y ambiental.

PALABRAS CLAVE: horno cubilote, horno de inducción, barro refractario, adobe refractario, carbón coque, eficiencia de fusión, materiales ferrosos, frecuencia alterna, bobina, campo electromagnético, ferroaleaciones, óxidos de azufre, óxidos de nitrógeno

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

RECONOCIMIENTOS

Agradezco a mi familia y amigos por su apoyo y paciencia durante el periodo de estudio, su apoyo con este proyecto, su asesoría y su comprensión, resalto y agradezco también al Instituto Tecnológico Metropolitano ITM por su participación en el desarrollo de procesos, a la facultad de ingenierías y el departamento de mecatrónica y Electromecánica, a la empresa fundiciones industriales FINSA S.A.S por su colaboración de toda su información para poder llevar a cabo el trabajo de grado.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

ACRÓNIMOS

T = temperatura (°C).

P = densidad (kg/m^3).

kW = kilovatios (kJ/s).

\dot{Q} fusión = calor de fusión (kW).

\dot{Q} refrigeración = calor perdido en el sistema de refrigeración de los cables del horno de inducción (kW).

\dot{Q} gases = calor perdido por los gases (combustión) (kW).

\dot{Q} Combustible = calor liberado por el combustible (carbón) (kW).

EES = software para calcular propiedades termodinámicas.

\dot{m} = flujo másico (kg/s).

\dot{V} = flujo volumétrico (m^3/s).

ΔT = delta de temperatura (°C).

Δh = delta de entalpía (kJ/kg).

LPM = litros por minuto.

U = viscosidad cinemática (m^2/s).

P = presión (kPa).

Cp = calor específico ($\text{kJ}/(\text{kg } ^\circ\text{C})$).

Re = Reynolds.

Pr = # de prandtl.

L = longitud (m).

r = radio (m).

R = resistencia térmica ($^\circ\text{C}/\text{W}$).

K = conductividad térmica ($\text{W}/(\text{m } ^\circ\text{C})$).

A = área (m^2).

h = coeficiente convectivo ($\text{W}/(\text{m}^2^\circ\text{C})$).

PC = poder calorífico (kcal/kg).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$m_{\text{consumida}}$ = masa consumida de carbón (kg).

D = diámetro (m).

V = velocidad (m/s).

F = factor de fricción.

Nu = número de Nusselt.

ΔE = delta de energía (kJ/kg).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

TABLA DE CONTENIDO

1. INTRODUCCIÓN	8
1.1 OBJETIVOS	10
1.1.1 General	10
1.1.2 Específicos	10
1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS	10
2. MARCO TEÓRICO	11
2.1 ESTADO DEL ARTE	11
2.1.1 Horno de inducción	11
2.1.2 Horno cubilote	14
2.2 AUDITORIA ENERGÉTICA	16
2.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	17
2.4 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA	17
3. METODOLOGÍA	20
4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	22
4.1 CÁLCULOS DE HORNO INDUCCION	22
4.1.1 Potencia eléctrica de entrada al horno	22
4.1.2 Calor de fusión	23
4.1.3 Calor disipado por refrigeración	23
4.1.4 Pérdidas de calor del cuerpo cilíndrico	26
4.1.5 Pérdida de calor en el piso del horno	28
4.1.6 Pérdida de calor de la tapa del horno	29
4.1.7 Calor perdido por los gases que se evaporan	30
4.1.8 Cálculo de eficiencia de primera ley	32
4.1.9 Balance energético	32
4.1.10 Sumatoria de pérdidas de calor de horno de inducción	32

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.1.11 Costo económico de operación del horno de inducción.	33
4.1.12 Certificados de calidad materiales refractarios/aislantes del horno.	34
4.2 CÁLCULOS DEL HORNO CUBILOTE.	37
4.2.1 Calor liberado por el combustible.	38
4.2.2 Calor de fusión.	38
4.2.3 Pérdida de calor por las paredes en la zona de fusión.	39
4.2.4 Pérdida de calor en la chimenea.	40
4.2.5 Pérdidas de calor en los humos.	43
4.2.6 Pérdida de calor parte inferior horno cubilote.	44
4.2.7 Balance energético.	45
4.2.8 Cálculo de eficiencia de primera ley.	46
4.2.9 Sumatoria de pérdidas de calor de horno de cubilote.	46
4.2.10 Emisiones contaminantes de horno cubilote.	46
4.2.11 Costo económico de operación del horno cubilote.	47
4.2.12 Certificados de calidad materiales refractarios/aislantes del horno.	49
4.3 comparativa de costos de los dos hornos.	50
4.3.1 Costo de mantenimiento horno cubilote.	50
4.3.2 Costo de mantenimiento de horno de inducción.	51
5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO.	53
REFERENCIAS	55

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1. INTRODUCCIÓN

A pesar de que Medellín es considerada la ciudad del país con el mejor sistema de transporte público, sostenible con el medioambiente, en la atmósfera se advierte una nube de color plomizo, gris, que cubre las montañas e impregna de negro las fachadas de los edificios y los pulmones de quienes la respiran.

Según un informe del 2015 de la Organización Mundial de la Salud (OMS), Medellín es la novena ciudad más contaminada en Latinoamérica, después de Cochabamba (Bolivia), Lima (Perú), Río de Janeiro (Brasil), Monterrey y Toluca, (México), Guatemala, Tegucigalpa (Honduras) y Belo Horizonte (Brasil). En el décimo puesto de la lista de la OMS está Bogotá, con unos pocos puntos de diferencia frente a Medellín.

En Medellín se debe hacer más a menudo el día sin carro y sin moto como el que se hizo en día 3 de abril del 2016 que se tuvo resultados positivos con respecto a la calidad de aire de la ciudad y así evitar generar más daños en la atmósfera e impedir la propagación de enfermedades respiratorias y pulmonares por la polución en el aire.



Figura 1. Contaminación de la ciudad de Medellín

Los que más contaminan son los camiones, volquetas y las motos, les siguen los buses y los automóviles, por último, los taxis. Estos vehículos generan macropartículas de 2,5, que son las que

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

contaminan el aire y afectan la salud humana. Una de las medidas de movilidad para mejorar la calidad del aire en la ciudad es la restricción de la circulación de volquetas en el perímetro urbano.



Figura 2. Contaminación del aire por los vehículos.

En Medellín se han hecho muchas medidas para disminuir el impacto ambiental aplicando un plan de choque buscando una mejoría en la calidad del aire. Medidas tales como el pico y placa para carros y motos 2 tiempos hace que disminuya la cantidad de transporte particular y así no hay tanto caos y tanta contaminación ambiental. A nivel industrial también se hace necesario estudiar el impacto de los procesos productivos de las empresas en el medio ambiente.

En la empresa fundiciones industriales S.A.S en la actualidad se cuenta con dos hornos de fundición, un horno de inducción que por medio de electricidad funde la chatarra para sacar diferentes piezas para la industria; este horno sale muy costoso por su elevado consumo de energía, pero su impacto ambiental es mínimo. Se cuenta también con un horno de cubilote que se utiliza para la fundición de chatarra un poco menos pura de la que se utiliza en el horno de inducción; esto hace que el horno sea un poco más elevado su impacto ambiental con respecto al horno de inducción y también porque utiliza carbón coque.

Este estudio se va realizar para demostrar por medio de cálculos cuál de los dos hornos es más eficiente y el impacto ambiental de cada uno.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

1.1 OBJETIVOS.

1.1.1 General.

Elaborar una auditoria energética de horno cubilote e horno de inducción de la empresa Finsa para indicar cuál es la eficiencia de cada uno y cuál es el impacto ambiental.

1.1.2 Específicos.

- Identificar y realizar mediciones de variables que caractericen los sistemas, tales como temperaturas, presión y caudal.
- Realizar balances de masa y energía para determinar eficiencia de primera ley de los sistemas.
- Evaluar el impacto ambiental y los costos económicos que generan los hornos que tiene la empresa.

1.2 ORGANIZACIÓN DE LA TESIS.

Después de la pertinente introducción al proyecto, se procede con el marco teórico donde se presentan los datos técnicos relativos a la auditoria a realizar, ofreciendo así una idea de los diferentes elementos que deben conocerse para comprender este trabajo. Posteriormente, se trata el estado del arte para un estudio a profundidad de auditoria de este tipo que se han hecho en otras empresas. Luego se presenta la metodología empleada para el cumplimiento de los objetivos, presentando las correspondientes actividades. Finalmente se presenta la sección de resultados donde se evidencian los puntos vistos en la metodología y se presenta un informe detallado de los hornos de fundición de la empresa FINSA.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2. MARCO TEÓRICO

2.1 ESTADO DEL ARTE.

2.1.1 Horno de inducción.

Para hablar de hornos de inducción, hay que remontarse a los años 50s, cuando la industria de la fundición se da cuenta de las ventajas económicas de los sistemas eléctricos frente a la producción con otras clases de hornos. A mediados de los 70s, se convierten en la mejor opción para fundir materiales ferrosos y no ferrosos y en los 80s surgen unidades de alta potencia y frecuencia que demuestran mayor eficiencia y productividad. Convirtiéndose así, en la manera preferida de fundir metales.

Los hornos de inducción son equipos eléctricos que utilizan una corriente inducida para fundir la carga (material). Consisten en 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.



Figura 3. Horno de inducción FINSA. Proceso de vaciado en horno de inducción.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- A. Paneles: Están contruidos de acero resistente para proteger la bobina durante la operación de horneo.
- B. Casco de protección: Sirve como una barrera impenetrable entre el metal salpicado y la bobina.
- C. Tapas aisladas que minimizan la pérdida de calor.
- D. Anillo recolector de humo: Especialmente diseñado para eliminar humo nocivo y humo durante el ciclo de fundición.
- E. Espiras macizas: Optimizan el rendimiento en la fundición.
- F. Yugos magnéticos: Reducen el calor excesivo.
- G. Espacios entre las espiras: Optimizan eficiencia eléctrica y reducen humedad.
- H. Parte inferior abierta: Ayuda a reducir humedad y ventilar.
- I. Bobinas de enfriamiento: Amplían la vida del recubrimiento
- J. Formas refractarias.
- K. Detección de fugas con polo a tierra para mayor seguridad.
- L. Tubería adecuada para su aplicación.
- M. Aislamiento de alta temperatura. Barrera de aislamiento eléctrico y térmico.

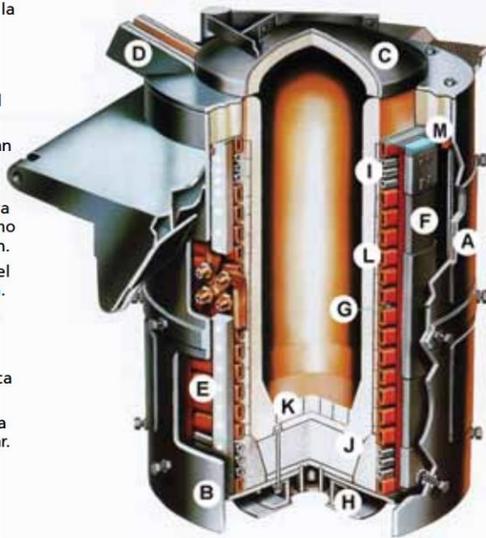


Figura 4. Partes de un horno de inducción (Botero, 2011).

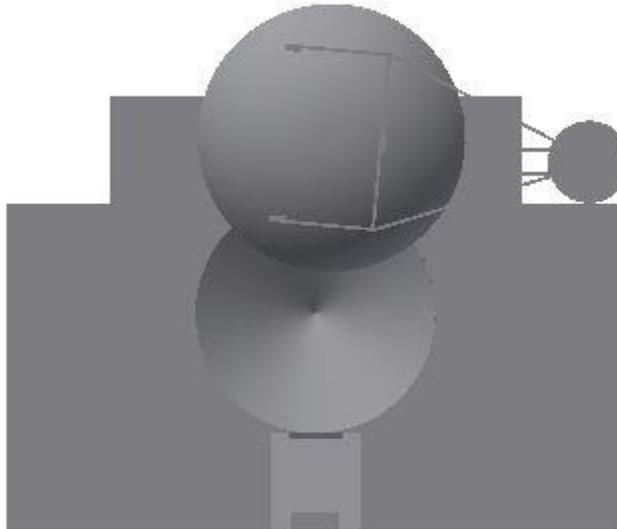


Figura 5. Vista superior de horno inducción de FINSA.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

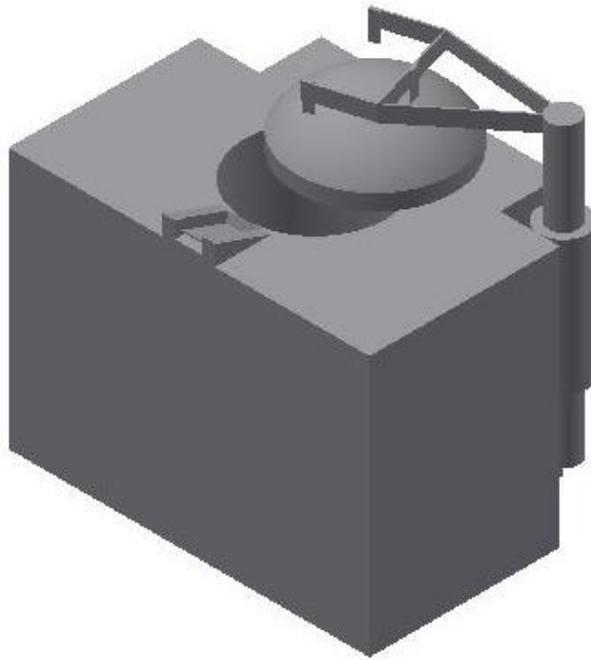


Figura 6. Vista isométrica de horno de inducción de FINSA.

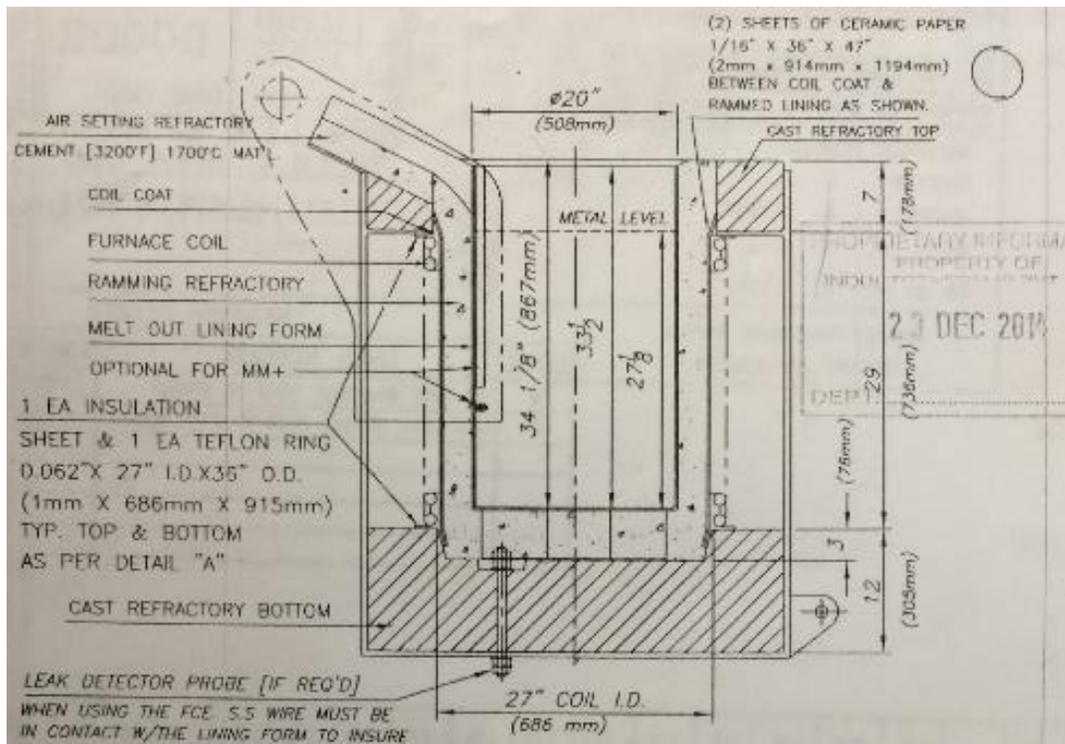


Figura 7. Detalle de plano de horno de inducción FINSA.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

2.1.2 Horno cubilote.

La primera patente del horno de cubilote surgió en el año 1794 y se le otorgó a John Wilkinson de Inglaterra, conservando su forma fundamental hasta nuestros días. Naturalmente, ha sufrido variaciones estructurales y se le han otorgado aditamentos. Sin embargo, se han rediseñado algunas de sus partes, principalmente en el tema de toberas. Algo que no ha cambiado es su forma tubular y en posición vertical, con la entrada de la carga superior y un contacto directo entre el combustible sólido y la carga metálica se ha mantenido inalterable, tal como se muestra en la Figura 8.

El cubilote posee una *eficiencia de fusión* alta en comparación con los demás hornos empleados con el mismo fin. Esto se explica, porque en este tipo de horno la carga metálica a fundir (arrabio, chatarra de acero, ferroaleaciones, rechazos de la producción, etc.), está en contacto directo con el combustible sólido (coque), que se emplea para su fusión. Esta eficiencia de fusión se entiende como la relación que existe entre el calor potencial que hay en el hierro fundido que sale del cubilote y el total del calor que entra al proceso (combustión de coque, procesos de oxidación de índole exotérmica y calor sensible en el aire que se sopla dentro del horno). Así, por ejemplo, en condiciones favorables de eficiencia (empleando soplo caliente), se pueden alcanzar valores algo superiores al 40 %.

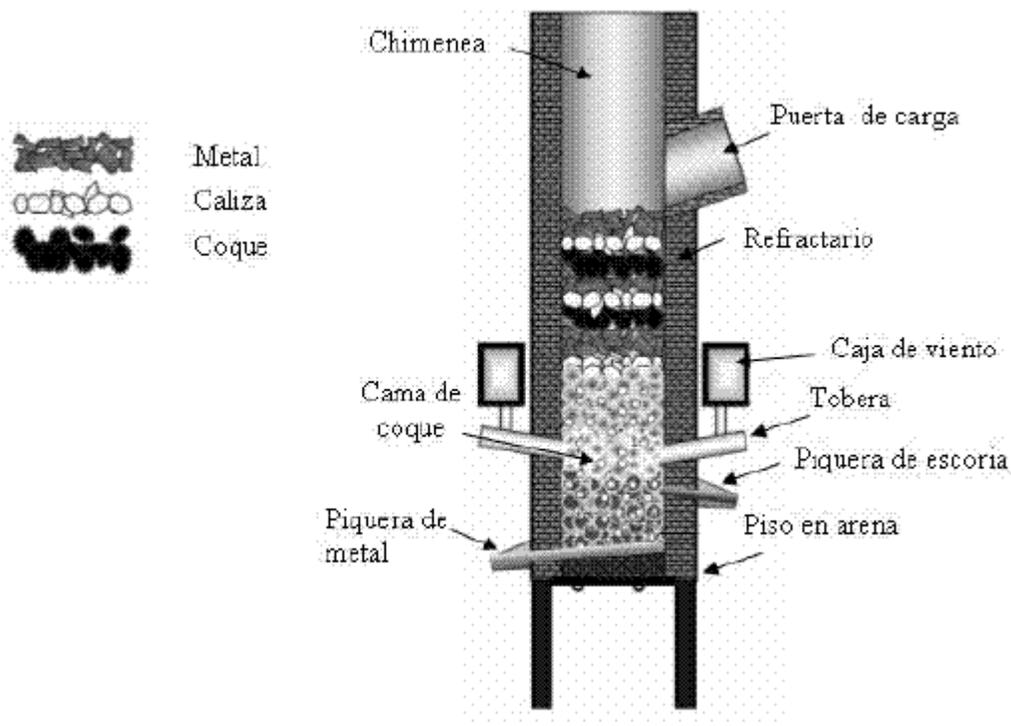


Figura 8. Partes de un horno cubilote (Aristizábal Sierra, Mejía, Silva, Pineda, & Rojas, 2006).

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 9. Horno cubilote en operación FINSA.



Figura 10. Vaciado de producción FINSA.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

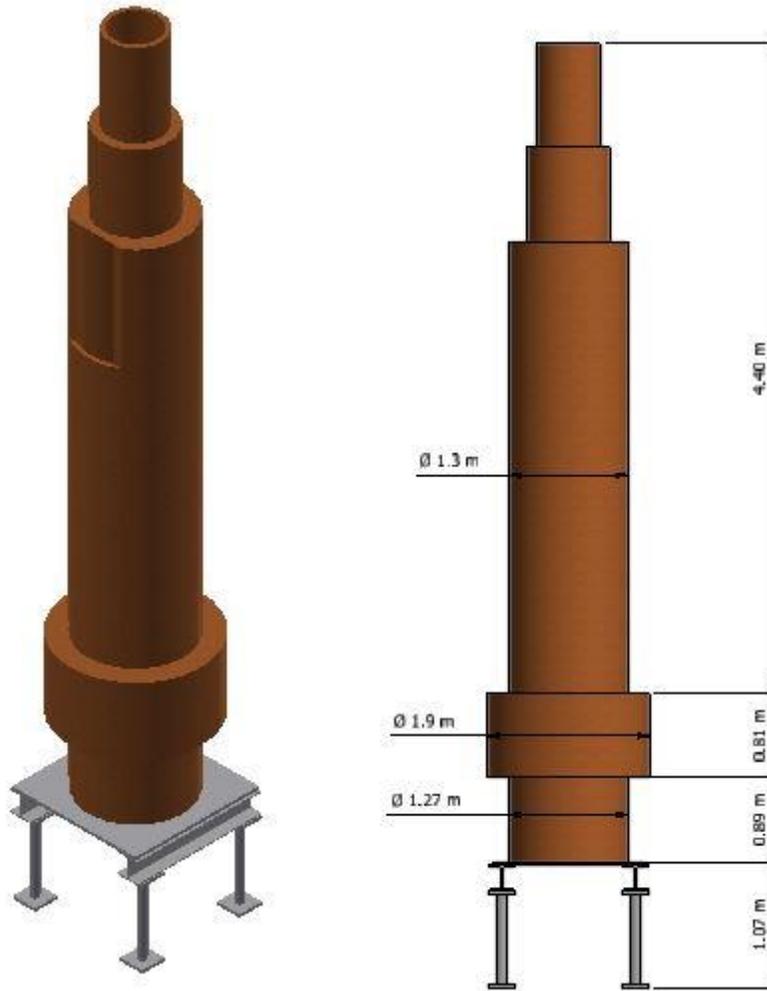


Figura 11. Horno cubilote de FINSA. Izquierda vista isométrica, derecha vista frontal.

2.2 AUDITORIA ENERGÉTICA.

Es un procedimiento sistemático para obtener conocimientos adecuados del perfil de energía existente de una instalación industrial o de un servicio privado o público o un servicio de transporte, determinar y cuantificar las posibilidades de ahorro de energía rentables y elaborar un informe al respecto.

Una auditoria energética es una herramienta fundamental a la hora de enfrentarse a la reducción de consumo energético. La auditoría permite saber que consumos son los más importantes y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

sobre cuales hay mayores posibilidades de ahorro. Además, una auditoria energética permite conocer el potencial de ahorro y la rentabilidad de posibles actuaciones. Como ejemplos exitosos de auditorías energéticas se pueden mencionar:

- Una auditoría energética realizada en 5 fundiciones de hierro colado en Italia permitió identificar la utilización de energía en los diferentes procesos que a partir de la fusión del hierro llegan al acabado de la pieza fundida. Se examinó el equipamiento principal y se evaluó la influencia de este en el consumo total de energía, produciendo un análisis detallado del uso de energía por departamento y índices de rendimiento de la energía (Lazzarin & Noro, 2015).
- En Bucaramanga, Santander, la empresa de herrajes fantaxias Ltda se dedica a la producción de piezas de zamak y cuenta con cinco hornos tipo crisol que operan con gas natural como combustible (Gordillo Muñoz, 2005). En esta empresa se realizó una auditoria energética que se dividió en dos partes:
 - La primera fue el seguimiento de operación en los hornos y consumo de combustibles.
 - La segunda consistió en determinación de focos de perdida que permitieron el planteamiento de mejoras en el diseño de los hornos y un estudio de alternativas que logren disminuir las pérdidas de calor y aumente la eficiencia térmica en los equipos.
- En Miranda de Ebro, España, se hizo una auditoria energética a una empresa situada en el polígono industrial de bayas, dedicada al tratado térmico de vidrio, por la Universidad de la Rioja (De Pablo Reina, 2013-2014). Este estudio determino las maneras en las se puede lograr un aumento del rendimiento y la optimización del consumo energético en la empresa, lo cual es imprescindible actualmente para poder competir en la actual situación económica y empresarial.

2.3 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.

En la empresa fundiciones industriales que está situada en el noroccidente de Medellín hay dos hornos diferentes de fundición de hierro gris, los cuales son horno cubilote, que opera a carbón, y horno inducción, que opera con electricidad. A estos hornos se les va a realizar una auditoria energética para saber cuál de los dos conviene más por costo de energía o por contaminación al medio ambiente.

2.4 DESCRIPCIÓN DE LA EMPRESA.

FINSA es una organización creada el 10 de agosto de 1995, por la inquietud de dos ingenieros que tenían como objetivo principal fundir piezas de metales ferrosos y no ferrosos y la comercialización de los mismos para satisfacer las necesidades del sector metalmeccánico y

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

mejorar la calidad de vida a la comunidad del corregimiento de San Cristóbal, y vecinos de Medellín, Colombia y con la ayuda de la Ladrillera San Cristóbal que cede un terreno en comodato para que los socios construyeran una bodega con las mejores características de construcción. Se funde por primera vez en mayo 21 de 1996.

La empresa comienza su etapa de ventas industriales al sector ladrillero de la ciudad y se consiguen otras líneas industriales como equipos para gimnasio (FORMA), ruedas industriales (IMSA) y pesas para ascensor (COSERVICIOS), así comienza una etapa de crecimiento en producción de dos toneladas por semana del año 1996, a treinta toneladas semanales en la actualidad. Esta empresa ha llegado a ser una de las mejores en el campo de la fusión llegando a mejorar sus procesos y aleaciones de sus productos para producir materiales más específicos como es el hierro blanco, nodular, alto cromo y Ni – Hard.

Cuenta con líneas comerciales definidas que están dirigidas al sector de la construcción y amoblamiento como son bancas colectivas, sillas individuales, bolardos, rejas sumidero, rejas alcorque, basureras que hacen parte del mobiliario urbano, piezas para gimnasios como partes de máquinas y equipos de pesas; pero también puede diseñar, desarrollar y fabricar productos exclusivos de acuerdo a planos y especificaciones.

En la actualidad cuenta con un horno de inducción con dos cubas de una capacidad de 1000 Kg/hora cada una y horno de cubilote. Un taller de máquinas y herramientas que se encuentra dotado de torno CNC, fresadora, tornos convencionales y granalladoras, donde se da el mecanizado a las piezas que lo requieren, prestando así un servicio integral a los clientes.

Los productos están dirigidos a satisfacer las necesidades de clientes de los sectores de la industria del sector mecánico, automotriz, cementero, civil, construcción, alimenticio, orfebre, metalmecánico, agroindustrial, gimnasios, entre otros. En las siguientes imágenes se muestran algunos de los productos fabricados por la empresa.



Figura 12. Logo de la empresa FINSA.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 13. Productos típicos de Finsa.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

3. METODOLOGÍA

Para el cumplimiento de los objetivos se propone realizar una auditoria energética de los dos hornos de fundición mencionados, para encontrar la eficiencia de operación actual de dichos equipos.

Inicialmente se buscó más información sobre los hornos de inducción, horno cubilote y auditorías energéticas para conocer más a fondo el tema y poder desarrollar un buen trabajo esta búsqueda de información incluyo una revisión de otros trabajos de grados, de libros, de artículos de investigación en bases de datos y pagina web de la empresa FINSA y empresas similares.

Luego se caracterizó el consumo energético de los hornos inducción y horno cubilote. Para el horno de inducción se tenían datos del contador que se toman antes y después de cada fusión. En la empresa se cuenta con un formato de registro de información por cada colada donde se anotan los datos de kilogramos fundidos, la hora de fusión, los kWh consumidos y el tipo de aleación requerida. Para el horno de cubilote, el consumo de carbón también se registra en otro formato de control de chatarra que se va actualizando de cada 12 kg de carbón por cada 100 kg de chatarra. De la anterior información también se puede obtener la cantidad de material que se va fundiendo.

A continuación se estimaron las pérdidas de calor en los dos hornos. En el de inducción se contaban con los planos de fabricación del equipo los cuales contienen todas las dimensiones internas y externas como diámetros, espesores, alturas, caudal de bomba, entre otras. Se consultó también el tipo de aislante que se utiliza en dicho horno. Adicionalmente por ley este horno tiene resultados de pruebas de emisiones contaminantes con los cuales estimar la pérdida de calor por los gases propios de la fusión; con toda esta información y teoría de termodinámica y transferencia de calor se pudo calcular las pérdidas de calor del sistema.

En el cubilote no había planos, pero se tomaron físicamente con flexómetro y calibrador pie de rey. En el horno cubilote se contaba con la composición del barro refractario y del carbón coque, también se contó con pruebas isocinéticas de dicho horno. En ambos hornos se tuvo que medir todas las temperaturas con un termopar tipo K y con un multímetro.

Se revisaron todos los manuales del horno de inducción para obtener algunos de estos datos para proceder a hacer cálculos y también se manejó el EES para calcular las propiedades termodinámicas.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con toda esta información se procede a realizar los balances energéticos de primera ley de la termodinámica y calcular eficiencia de los hornos. A partir de los datos de emisiones, se estima el impacto ambiental y económico asociado al uso de combustibles en ambos hornos.

Después se caracterizan las emisiones contaminantes de los hornos tales: como material particulado, óxidos de azufre y óxidos de nitrógeno. Para esto se utilizan índices de emisión reportados por la unidad de planeación minero energética (UPME) de Colombia.

Finalmente se procede a redactar informe final con los resultados, conclusiones y recomendaciones obtenidas en este trabajo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tabla 1. Estado actual de operación del horno de inducción.

Descripción	Símbolo	Medida	Unidad	Tomado de
Masa de hierro fundido	M	1000	kg	Informe de consumo de la empresa
Temperatura de operación	T	1500	°C	Pirómetro
Temperatura inicial de chatarra	T	25	°C	Termopar tipo k
Tiempo de operación	T	5280	seg	Cronómetro
Presión manométrica del agua de refrigeración	P	50	psi	Manómetro de bomba
Caudal de bomba	\dot{V}	221	LPM	Planos del horno
Temperatura del piso	T	52	°C	Termopar tipo k
Temperatura externa del cuerpo del horno	T	70	°C	Termopar tipo k
Temperatura externa de la tapa del horno	T	137.4	°C	Termopar tipo k
Presión atmosférica	P	86	kPa	Barómetro
Temperatura gases de combustión	T	42	°C	Prueba isocinéticas

4.1 CÁLCULOS DE HORNO INDUCCION

4.1.1 Potencia eléctrica de entrada al horno

Para hallar el consumo de kWh, en la empresa se toma una medida total para 5 coladas de 1000 kg cada una, la cual es aproximadamente 3091 kWh (cada colada toma aproximadamente 1.3 horas).

El dato tomado del contador de la subestación eléctrica del horno de inducción, se toma con la diferencia de kWh de inicio de colada menos el dato de final de colada.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22



Figura 14: tacómetro de contador del horno inducción INDUTECH.

Con estos datos se puede ver que el horno tiene una potencia eléctrica:

$$\dot{E}_{entrada} = 3091\text{kW}/(5 \times 1.3 \text{ horas}) = 475 \text{ kW}$$

4.1.2 Calor de fusión

La tasa de transferencia de calor necesaria para llevar la chatarra (hierro fundido) de 25° a 1500°C es:

$$\dot{Q}_{\text{fusión}} = \Delta E_{\text{sistema}} = mC_p(T_2 - T_1)$$

$$\dot{Q}_{\text{fusión}} = (1000\text{Kg})(0,9098\text{kJ/kg}^\circ\text{C})(1500^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_{\text{fusión}} = (1000)(0,9098\text{kJ}/^\circ\text{C})(1475^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q}_{\text{fusión}} = 1341955 \text{ kJ}$$

$$\dot{Q}_{\text{fusión}} = 1,34 \text{ GJ}$$

$$\dot{Q}_{\text{fusión}} = (1,34 \text{ GJ})/(4680 \text{ s})$$

$$\dot{Q}_{\text{fusión}} = 286.3\text{kJ/s} - \text{kW}$$

4.1.3 Calor disipado por refrigeración

Este es el calor generado por el cableado eléctrico del horno de inducción. Este se refrigera con

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

agua, la cual pasa en un circuito cerrado por un intercambiador de placas. En este intercambiador el agua caliente es enfriada por agua fría que se hace circular por el intercambiador, la cual fluye a una tasa de 221 LPM y se calienta 1 grado Celsius después de pasar por el intercambiador. La bomba de agua del lado frío trabaja con una presión manométrica de 50 psi, es decir:

50 psi = 344.7 kPa manométrica

Presión absoluta: 344.7 kPa + 86 kPa = 430.7 kPa

Datos calculados con el EES:

$C_p = 4.182 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C}$ (agua)

Densidad = 998.4 kg/m^3 (agua)

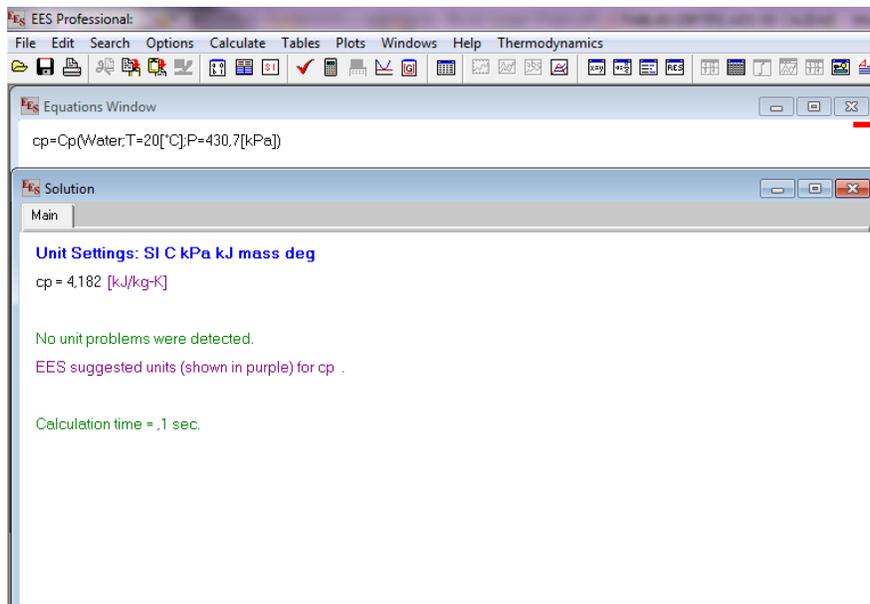


Figura 15. Cálculo del C_p del agua con el programa EES.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

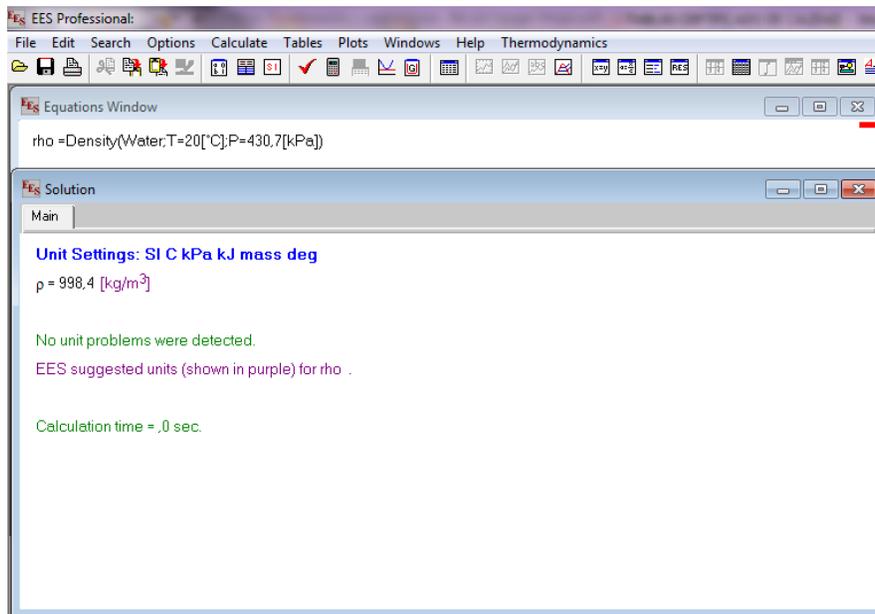


Figura 16. Cálculo de la densidad del agua con el programa EES.

Conversión de LPM a m^3/s

$$221 \text{ LPM} \times \frac{1.66667 \times 10^{-5} m^3/s}{1 \text{ LPM}} = 3.683 \times 10^{-3} m^3/s$$

$$\dot{m} = \rho \dot{V}$$

$$\dot{m} = (4.182 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(3.683 \times 10^{-3} m^3/s)$$

$$\dot{m} = 3.677 \text{ kg/s (flujo másico de agua fría)}$$

$$\dot{Q} \text{ refrigeración} = \dot{m} \times C_p \times \Delta T$$

$$\dot{Q} \text{ refrigeración} = (3.677 \text{ kg/s})(4.182 \text{ kJ/kg}^\circ\text{C})(1^\circ\text{C})$$

$$\dot{Q} \text{ refrigeración} = 15.37 \text{ Kw}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.1.4 Pérdidas de calor del cuerpo cilíndrico.

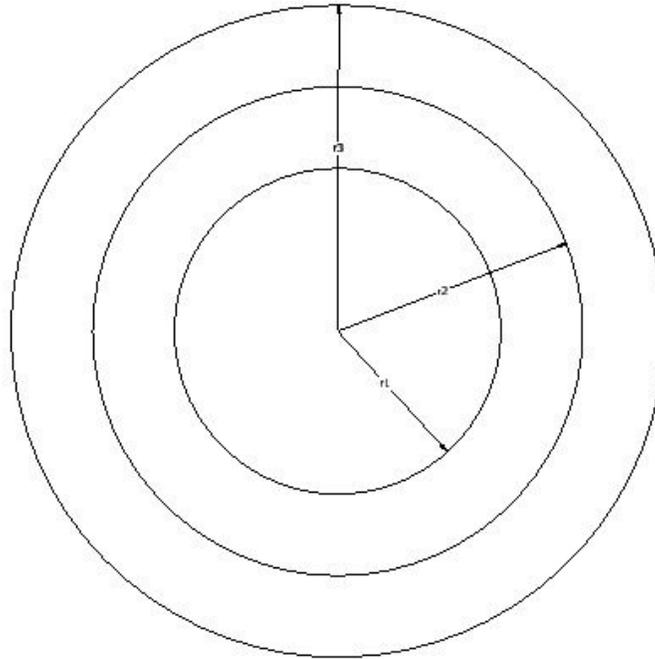


Figura 17. Corte de la sección cilíndrica del horno de inducción

Aunque externamente el horno es rectangular, para facilitar el análisis se asume un cuerpo cilíndrico aproximado.

$L = 0.867$ m (alto del cilindro).

$r_1 = 0.254$ m

$r_2 = 0.343$ m

$r_3 = 0.635$ m

Refractario LGS: $K = 6.21$ W/m°C (Tomado de tabla A4 libro de Transferencia de calor de Cengel para dióxido de Silicio)

Cemento refractario: $K = 0.7$ W/m°C (Tomado de tabla A5 libro de Transferencia de calor de Cengel)

Las resistencias térmicas R por conducción R_1 (entre r_1 y r_2 , material: refractario LGS) y R_2 entre r_2 y r_3 , material: cemento refractario), así como la resistencia térmica por convección externa (natural) R_0 se calculan como se muestra a continuación:

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_1 L} \quad R_1 = \frac{\ln\left(\frac{0.343m}{0.254m}\right)}{2\pi\left(6.21 \frac{W}{m^{\circ}C}\right)(0.867m)} \quad R_1 = 8.879 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}C/W$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_2 L} \quad R_2 = \frac{\ln\left(\frac{0.635m}{0.343m}\right)}{2\pi\left(0.7 \frac{W}{m^{\circ}C}\right)(0.867m)} \quad R_2 = 0.161 \text{ }^{\circ}C/W$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L \rightarrow A_3 = 2\pi (0.635m)(0.867m) \rightarrow A_3 = 3.45m^2$$

$$R_0 = \frac{1}{h_2 A_3} \quad R_0 = \frac{1}{(5 \text{ w}/m^2\text{ }^{\circ}C)(3.45m^2)} \quad R_0 = 0.05 \text{ }^{\circ}C/W$$

$$R_{total} = R_1 + R_2 + R_0$$

$$R_{total} = 8.879 \times 10^{-3} \text{ }^{\circ}C/W + 0.161 \text{ }^{\circ}C/W + 0.05 \text{ }^{\circ}C/W$$

$$R_{total} = 0.21 \text{ }^{\circ}C/W$$

La pérdida de calor se calcula entonces como:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{total}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1500^{\circ}C - 70^{\circ}C}{0.21 \text{ }^{\circ}C/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{1430^{\circ}C}{0.01 \text{ }^{\circ}C/W}$$

$$\dot{Q} = 6809 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 6.8 \text{ kW}$$

4.1.5 Pérdida de calor en el piso del horno

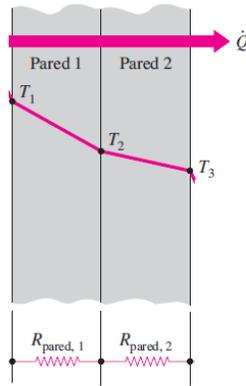


Figura 18. Corte de la sección inferior (piso) del horno de inducción (T1 es el piso del crisol, T3 es el piso del horno).

La pared 1 es la capa de material entre el crisol interno y la capa inferior (pared 2) en el piso (ver figura 7). La pared 1 está rellena de refractario LGS, mientras que la pared 2 (“el piso” del horno) está rellena de cemento refractario.

$$L_1 = 0.124 \text{ m}$$

$$R_{\text{pared 1}} = \frac{L_1}{K_1 A}$$

$$R_{\text{pared 1}} = \frac{0.124 \text{ m}}{\left(6.21 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.369 \text{ m}^2)}$$

$$R_{\text{pared 1}} = 0.054^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = \pi \times (0.343 \text{ m}^2)$$

$$A = 0.369 \text{ m}^2$$

$$L_2 = 0.2286 \text{ m}$$

$$R_{\text{pared 2}} = \frac{L_2}{K_2 A}$$

$$R_{\text{pared 2}} = \frac{0.2286 \text{ m}}{\left(0.7 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.369 \text{ m}^2)}$$

$$R_{\text{pared 2}} = 0.885^\circ\text{C}/\text{W}$$

$$T_{\text{piso}} = 52^\circ\text{C}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_{total} = R_1 + R_2$$

$$R_{total} = 0.054^{\circ}\text{C/W} + 0.885^{\circ}\text{C/W}$$

$$R_{total} = 0.939^{\circ}\text{C/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{total}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1500^{\circ}\text{C} - 52^{\circ}\text{C}}{0.939^{\circ}\text{C/W}}$$

$$\dot{Q} = 1542 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 1.5 \text{ kW}$$

4.1.6 Pérdida de calor de la tapa del horno

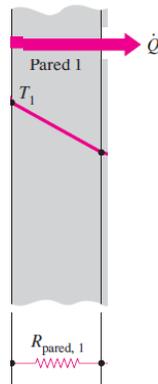


Figura 19. Corte de la tapa superior del horno de inducción. T1 es la temperatura de fusión del material.

$$\text{Espesor} = 0.24\text{m}$$

$$A = \pi \times r^2$$

$$A = \pi \times (0.395 \text{ m}^2)$$

$$A = 0.49 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{pared 1}} = \frac{L_1}{K_1 A}$$

$$R_{\text{pared 1}} = \frac{0.24\text{m}}{\left(6.21 \frac{\text{W}}{\text{m}^{\circ}\text{C}}\right)(0.49\text{m}^2)}$$

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_{\text{pared 1}} = 0.07 \text{ } ^\circ\text{C}/\text{W}$$

La temperatura T2 es la externa superficial de la tapa, la cual se tomó con un termopar tipo K y corresponde a 137.4°C. Por tanto el calor perdido por la tapa es:

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{total}}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1500^\circ\text{C} - 137.4^\circ\text{C}}{0.07^\circ\text{C}/\text{W}}$$

$$\dot{Q} = 19465 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 19.4 \text{ kW}$$

4.1.7 Calor perdido por los gases que se evaporan

De acuerdo a la prueba isocinética, salen 34.1 m³/min de gases de fusión del horno por la chimenea a 42°C a una presión absoluta de 624.3 mmHg. La densidad este gas es:

Conversion de mmHg → kPa

$$624.3 \text{ mmHg} = 83233 \text{ Pa} = 83.2 \text{ kPa}$$

$$T = 42^\circ\text{C} + 273 = 315^\circ\text{K}$$

R = 0.287 kpa.m³/kg.K (se aproximan los gases de fusión al aire. Este dato se tomó de tabla A1 libro termodinámica de Cengel)

$$p = \frac{P}{RT}$$

$$p = \frac{83.2 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kpa.m}^3/\text{kg.K})(315\text{K})}$$

$$p = 0.92 \text{ kg/m}^3$$

$$\dot{V} = 34.1 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\dot{m} = p \dot{V}$$

$$\dot{m} = (0.92 \text{ kg/m}^3) (34.1 \text{ m}^3/\text{min})$$

$$\dot{m} = 31.3 \text{ kg/min} \times 1 \text{ min}/60\text{seg}$$

$$\dot{m} = 0.521 \text{ kg/seg (flujo másico de gases que salen del horno debido a la fusión del material)}$$

Datos sacados de EES:

$$h_1 (\text{caliente}) = 315.7 \text{ kJ/kg}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Esta es la entalpía de los gases a 42°C, temperatura medida de los gases de combustión de acuerdo a las pruebas isocinéticas en la tapa del horno. Se sigue aproximando estos gases como aire.

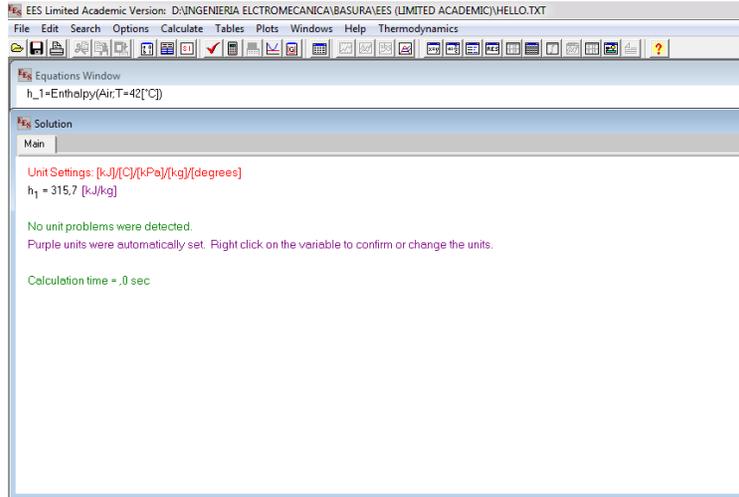


Figura 20. Cálculo de la entalpía de los gases de fusión (aproximados como aire) con el programa EES.

h_2 (frio) = 297.6 kJ/kg. Esta es la entalpía del aire a temperatura ambiente.

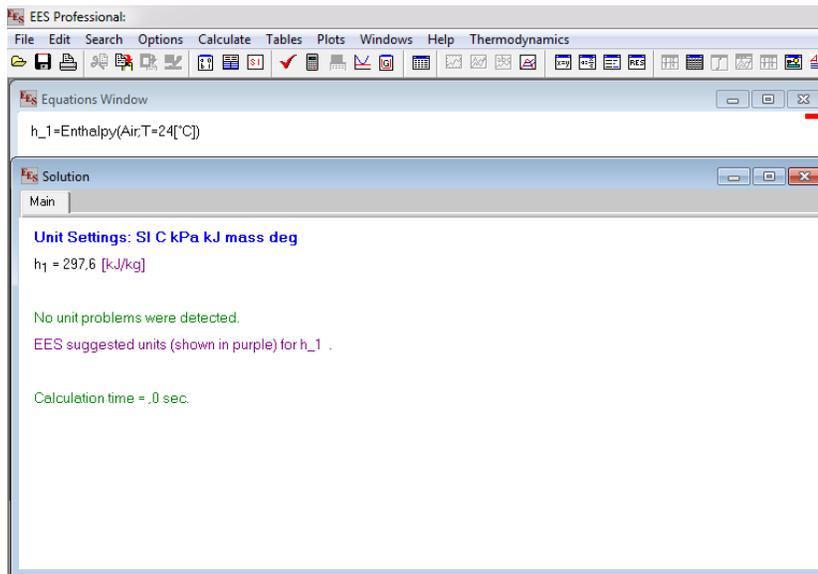


Figura 21. Cálculo de la entalpía del aire a temperatura ambiente con el programa EES.

$$\dot{Q}_{\text{gases}} = \dot{m} \times \Delta h$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$\dot{Q}_{\text{gases}} = 0.521 \text{ kg/s} \times (h_2 - h_1)$$

$$\dot{Q}_{\text{gases}} = 0.521 \text{ kg/s} \times (315.7 - 297.6) \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q}_{\text{gases}} = 9.4 \text{ kW}$$

4.1.8 Cálculo de eficiencia de primera ley.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\dot{Q}_{\text{fusión}}}{\dot{Q}_{\text{entrada}}}$$

$$\text{Eficiencia} = \frac{286.3 \text{ kW}}{475 \text{ kW}}$$

$$\text{Eficiencia} = 0.60$$

$$\text{Eficiencia} = 60\%$$

4.1.9 Balance energético.

$$\dot{Q}_{\text{combustible}} - \dot{Q}_{\text{fusión}} - \dot{Q}_{\text{pérdidas}} = 0$$

$$475 \text{ kW} - 286.3 \text{ kW} - 188.7 \text{ kW} = 0$$

4.1.10 Sumatoria de pérdidas de calor de horno de inducción.

Si se suman las pérdidas de calor en el cuerpo cilíndrico del horno, en el piso del horno y en la tapa del horno se obtiene:

$$\sum \dot{Q} = 6.8 \text{ kW} + 1.5 \text{ kW} + 19.4 \text{ kW}$$

$$\sum \dot{Q} = 27.7 \text{ kW}$$

Con este total de pérdidas por las paredes, se obtiene el total de pérdidas de calor en el sistema:

$$\dot{Q}_{\text{pérdidas}} = \sum \dot{Q} + \dot{Q}_{\text{gases}} + \dot{Q}_{\text{refrigeración}}$$

$$\dot{Q}_{\text{pérdidas}} = 27.7 \text{ kW} + 9.4 \text{ kW} + 15.37 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{pérdidas}} = 52.47 \text{ kW}$$

De acuerdo al balance de primera ley $\dot{Q}_{\text{Pérdidas}} = 188.7 \text{ kW} - 52.47 \text{ kW} = 136.23 \text{ kW}$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Con la anterior formula se estiman las pérdidas de calor que no se calcularon, tales como las perdidas por escoria del horno de inducción que es aproximadamente 50 kg por tonelada y otras pérdidas no tenidas en cuenta y que son difíciles de calcular.

4.1.11 Costo económico de operación del horno de inducción.

El consumo del horno de inducción por cada encendida es 3091 kWh.

$$3091\text{kWh} \times \frac{\$405}{1\text{kWh}} = \$ 1251855$$

Este horno trabaja con 4 operarios para que su funcionamiento sea bien productivo y eficiente.

- Operario de horno de inducción: se encarga de manejar el horno para el vacéo de la colada.
- Clasificador de chatarra: se encarga de separar la materia prima para que la chatarra que se va a fundir no esté contaminada.
- Aporcador: se encarga de aportar arena al borde de los moldes para que los gases cuando se esté vaciando la colada no los reviente.
- Vaciador: se encarga de guiar el puente grúa con la cuchara para vaciar la colada en los moldes.

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.1.12 Certificados de calidad materiales refractarios/aislantes del horno.

Tabla 2. Certificado de calidad PS SUPER PLASTIC

Características técnicas		Imagen fotográfica	
Componentes	Porcentaje		
AL ₂ O ₃	44.3 %		
SiO ₂	49.6 %		
CaO	0.2 %		
TiO ₂	2.0 %		
Fe ₂ O ₃	1.2 %		
MgO	0.3 %		
Alkali	1.0 %		
SO ₃	1.3 %		
otros	0.1 %		
TOTAL	100 %		
Descripción física: Producto refractario amasable de color gris.			
Instrucciones de uso: Este producto debe de estar protegido de la humedad con una bolsa y en una caja de cartón, este producto se amasa con las manos y se emplea para cubrir las cucharas donde se vierte la colada para vaciar en la producción.			

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 3. Certificado de calidad DRI-VIBE LGS

Características técnicas		Imagen fotográfica
Componentes	Porcentaje	
AL ₂ O ₃	0.6 %	
SiO ₂	99.0 %	
Fe ₂ O ₃	0.1 %	
otros	0.3 %	
TOTAL	100 %	
Descripción física: Material granulado apizonable con una granometría muy variable. Este producto es de color beige.		
Instrucciones de uso: Este producto se utiliza entre la pared interna del horno de inducción y la formaleta metálica que forma el diámetro interno del horno, este producto se apisona para tener una mejor compactación.		

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 4. Certificado de calidad BLUE PAK PLASTIC

Características técnicas		Imagen fotográfica	
Componentes	Porcentaje		
AL ₂ O ₃	71.0 %		
SiO ₂	21.4 %		
P ₂ O ₅	3.3 %		
TiO ₂	1.5 %		
Fe ₂ O ₃	1.2 %		
Alkalies otros	0.7 % 0.9 %		
TOTAL	100 %		
Descripción física: Producto refractario amasable de color azul.			
Instrucciones de uso: Este producto debe de estar protegido de la humedad con una bolsa y en una caja de cartón, este producto se amasa con las manos y se emplea para cubrir la piqueta del horno de inducción por donde se guía la colada para vaciar en las cucharas.			

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2 CÁLCULOS DEL HORNO CUBILOTE.

Tabla 5. Tabla de estado actual del horno cubilote.

Descripción	Símbolo	Medida	Unidad	Tomado de
Poder calorífico del carbón	PC	7327	kcal/kg	Certificado de carbón suministrado por proveedor
Consumo de carbón	m	1160	kg	Informes de consumo
Tiempo total de operación	t	28800	s	Cronómetro
Chatarra fundida	m	1200	kg	Informe de consumo
Tiempo de fusión de una colada	t	3600	s	Informe de consumo
Temperatura de fusión	T1	1420	°C	Pirómetro
Temperatura externa del cuerpo del cilindro donde se da la combustión	T2	88.6	°C	Termopar tipo k
Temperatura de chimenea	T	46.3	°C	Termopar tipo k
Diámetro de chimenea	D	0.36	m	Flexómetro
Temperatura de salida de los gases	T1	374	°C	Termopar tipo k
Temperatura superficial de chimenea	T2	314	°C	Termopar tipo k

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.1 Calor liberado por el combustible.

$$Q \text{ Combustible} = PC \times m_{\text{consumida}}$$

$$Q \text{ Combustible} = 7327 \text{ kcal/kg} \times 1160 \text{ kg}$$

$$Q \text{ Combustible} = 8499320 \text{ kcal}$$

$$\text{kcal} \times \frac{1000 \text{ cal}}{1 \text{ kcal}} \times \frac{4.8168 \text{ J}}{1 \text{ kcal}}$$

$$8499320 \text{ kcal} \times \frac{1000 \text{ cal}}{1 \text{ kcal}} \times \frac{4.8168 \text{ J}}{1 \text{ kcal}}$$

$$Q \text{ Combustible} = 3.558 \times 10^{10} \text{ J}$$

$$\dot{Q} \text{ Combustible} = \frac{3.558 \times 10^{10} \text{ J}}{28800 \text{ s}}$$

$$\dot{Q} \text{ Combustible} = 1235416 \text{ J/seg}$$

$$\dot{Q} \text{ Combustible} = 1235416 \text{ W}$$

$$\dot{Q} \text{ Combustible} = 1235 \text{ kW}$$

4.2.2 Calor de fusión.

$C_p = 0,9345 \text{ kJ/kg} \text{ } ^\circ\text{C}$. Dato obtenido para hierro fundido de EES.

$$Q \text{ fusión} = \Delta E \text{ sistema} = m C_p (T_2 - T_1)$$

$$Q \text{ fusión} = (1200 \text{ kg})(0,9345 \text{ kJ/kg} \text{ } ^\circ\text{C})(1420^\circ\text{C} - 25^\circ\text{C})$$

$$Q \text{ fusión} = 1565859,6 \text{ kJ}$$

$$Q \text{ fusión} = 1,56 \text{ GJ}$$

$$\dot{Q} \text{ fusión} = \frac{1,56 \text{ GJ}}{3600 \text{ s}}$$

$$\dot{Q} \text{ fusión} = 433,3 \text{ kW}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.3 Pérdida de calor por las paredes en la zona de fusión.

Barro refractario: $K_1 = 2.87 \text{ W/m}^\circ\text{C}$

Lámina de acero: $K_2 = 45.3 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ (Datos tomados de Tabla A8 libro de transferencia de calor (Cengel & Ghajar, 2011))

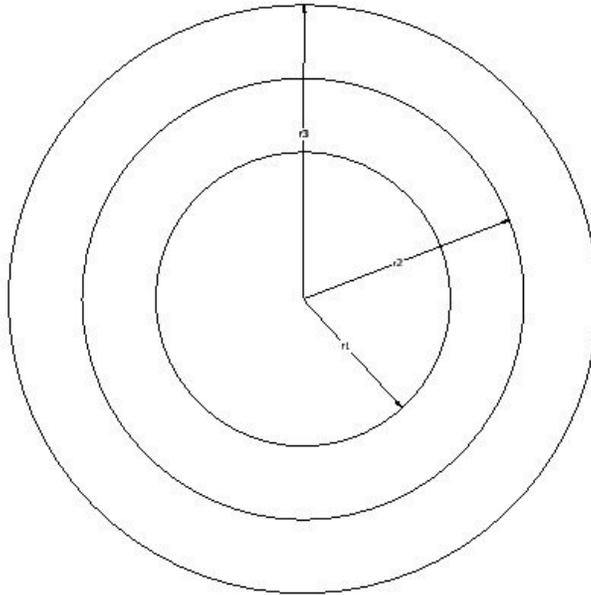


Figura 22. Corte de la sección cilíndrica de la zona de fusión del horno cubilote

$$r_1 = 0.937\text{m}$$

$$r_2 = 0.737\text{m}$$

$$r_3 = 0.975\text{m}$$

Entre r_1 y r_2 el material de relleno es barro refractario, mientras que entre r_2 y r_3 el material es lámina de acero.

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_1 L} \quad R_1 = \frac{\ln\left(\frac{0.937\text{m}}{0.737\text{m}}\right)}{2\pi\left(2.87 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.81\text{m})} \quad R_1 = \frac{0.24 \text{ m}}{2\pi\left(2.87 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.81\text{m})} \quad R_1 = \frac{0.24 \text{ m}}{14.6 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}} \quad R_1 = 0.016 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_2 L} \quad R_2 = \frac{\ln\left(\frac{0.975\text{m}}{0.937\text{m}}\right)}{2\pi\left(45.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.81\text{m})} \quad R_2 = \frac{0.039\text{m}}{230.5 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}} \quad R_2 = 1.691 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L \quad A_3 = 2\pi (0.975\text{m}) (0.81\text{m}) \quad A_3 = 4.96\text{m}^2$$

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

$$R_{total} = R_1 + R_2$$

$$R_{total} = 0.016 \text{ } ^\circ\text{C/W} + 1.691 \times 10^{-4} \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$R_{total} = 0.016 \text{ } ^\circ\text{C/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{total}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1420^\circ\text{C} - 88.6^\circ\text{C}}{0.016^\circ\text{C/W}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1331.4^\circ\text{C}}{0.016^\circ\text{C/W}}$$

$$\dot{Q} = 83212.5 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 83 \text{ kW}$$

4.2.4 Pérdida de calor en la chimenea.

$\dot{V} = 0.5 \text{ m}^3/\text{s}$ (El caudal fue tomado de prueba isocinética del horno)

$P = 610.83 \text{ mmHg} = 81.44 \text{ kPa}$ (La presión absoluta fue tomada de prueba isocinética del horno)

$T = 46.3^\circ\text{C} = 273 + 46.3 = 319.3\text{K}$ (La temperatura de salida de los gases fue tomada de prueba isocinética del horno). Con esta temperatura se obtiene del EES la entalpía para el aire: $h = 747.2 \text{ kJ/kg}$.

$$D = 1.3\text{m}$$

$$P = \rho RT \quad \rho = \frac{P}{RT}$$

$R = 0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K}$ Datos obtenido de tabla A1 del libro de termodinámica para aire (Cengel & Boles, 2012).

$$P_1 = \frac{P}{RT} \quad P_1 = \frac{81.44 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg} \cdot \text{K})(319.3 \text{ K})} \quad P_1 = \frac{81.44 \text{ kPa}}{91.6 \text{ kPa} \cdot \text{m}^3/\text{kg}} \quad \rho_1 = 0.88 \text{ kg/m}^3$$

De acuerdo al informe realizado por INCOMBUSTION el calor sensible que se pierde en la chimenea es aproximadamente 550.02 kJ/s (Union temporal INCOMBUSTION, 2016).

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El flujo másico de gases de combustión que salen de la chimenea del horno cubilote se calcula así:

$$\dot{m} = \frac{\dot{Q}}{h_2 - h_1} \quad \dot{m} = \frac{550.02 \text{ kJ/s}}{(747.2 - 297.6) \text{ kJ/kg}} \quad \dot{m} = 1.223 \text{ kg/s}$$

$$A_c = \frac{\pi D^2}{4} \quad A_c = \frac{\pi (1.3)^2}{4} \quad A_c = 1.32 \text{ m}^2$$

La temperatura real de los gases de combustión es superior a la reportada en las pruebas isocinéticas, ya que en esas pruebas se mide en el extremo superior de la chimenea, mientras que cerca al lecho de combustión la temperatura de los gases es:

$$T = 374^\circ\text{C} + 273 = 647\text{K}$$

La densidad para esta temperatura es:

$$p_2 = \frac{P}{RT} \quad p_2 = \frac{81.44 \text{ kPa}}{(0.287 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}\cdot\text{K})(647\text{K})} \quad p_2 = \frac{81.44 \text{ kPa}}{185.6 \text{ kPa}\cdot\text{m}^3/\text{kg}} \quad p_2 = 0.438 \text{ kg/m}^3$$

Dado que $\dot{m} = p_2 V A_c$ entonces:

$$V = \frac{\dot{m}}{A_c p_2} \quad V = \frac{1.223 \text{ kg/s}}{(1.32 \text{ m}^2)(0.438 \text{ kg/m}^3)} \quad V = \frac{1.223 \text{ m}}{0.578 \text{ s}} \quad V = 2.11 \text{ m/s}$$

Esta es la velocidad promedio de los gases de combustión cerca al lecho de combustión, justo al empezar la sección de la chimenea.

Para calcular el coeficiente convectivo de los gases de combustión en la chimenea se realiza el siguiente procedimiento:

De la tabla A15 libro transferencia de calor, se tiene que para el aire a temperatura 350°C , la viscosidad cinemática es $5.475 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}$, por tanto:

$$Re = \frac{VD}{\nu} \quad Re = \frac{(2.11 \text{ m/s})(1.3 \text{ m})}{5.475 \times 10^{-5} \text{ m}^2/\text{s}} \quad Re = \frac{2.743}{5.475 \times 10^{-5}} \quad Re = 50100.45$$

Este Reynolds es mayor a 10000 para flujo interno, por tanto el régimen de flujo es turbulento. El factor de fricción en este caso se aproxima con la fórmula de la pág 488 del libro transferencia de calor (8 – 65) asumiendo tubería lisa:

$$F = (0.790 \ln Re - 1.64)^{-2}$$

$$F = (0.790 \ln (50100.45) - 1.64)^{-2}$$

$$F = 0.013$$

Pr = # de Prandtl, se obtiene de tabla A15 temperatura $350^\circ\text{C} \rightarrow Pr = 1.64$

 ITM Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

El número de Nusselt se calcula con la correlación de *Dittus-Boelter*:

$$Nu = 0.023Re^{0.8}Pr^{0.3}$$

$$Nu = 0.023(50100.45)^{0.8}(1.64)^{0.3}$$

$$Nu = 153.4$$

$$h = \frac{K}{D}Nu \quad h = \frac{0.04721 \text{ W/m}^\circ\text{C}}{1.3\text{m}} \times 153.4 \quad h = 5.573 \text{ W/m}^2\text{C}$$

Después de calcular este coeficiente de convección interna, se procede a calcular las pérdidas de calor de la chimenea utilizando un análisis por resistencias térmicas similar a los mostrados en el horno de inducción. En este caso se consideran resistencias por convección interna y por conducción en el metal, ya que se midió la temperatura superficial de la chimenea y se asume uniforme sobre toda su longitud.

$$r_1 = 0.6436\text{m}$$

$$r_2 = 0.65\text{m}$$

$$A_1 = 2\pi r_2 L \quad A_1 = 2\pi (0.65\text{m}) (4.40\text{m}) \rightarrow A_1 = 17.97 \text{ m}^2$$

$$A_2 = 2\pi r_1 L \quad A_2 = 2\pi (0.6436\text{m}) (4.40\text{m}) \rightarrow A_2 = 17.79 \text{ m}^2$$

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_1 L} \quad R_1 = \frac{\ln\left(\frac{1.3\text{m}}{1.287\text{m}}\right)}{2\pi(45.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}})(4.40\text{m})} \quad R_1 = \frac{9.817 \times 10^{-3}}{1252.36 \text{ }^\circ\text{C/W}} \quad R_1 = 7.83 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_0 = \frac{1}{h_2 A_3} \quad R_0 = R_{\text{conv}} = \frac{1}{(5.573 \text{ W/m}^2\text{C})(17.79\text{m}^2)} \quad R_0 = 0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_0$$

$$R_{\text{total}} = 7.83 \times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C/W} + 0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\text{total}} = 0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$\dot{Q}_{\text{Chimenea}} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{total}}}$$

$$\dot{Q}_{\text{chimenea}} = \frac{374^\circ\text{C} - 314^\circ\text{C}}{0.01^\circ\text{C/W}}$$

$$\dot{Q}_{\text{chimenea}} = \frac{60^\circ\text{C}}{0.01^\circ\text{C/W}}$$

$$\dot{Q}_{\text{chimenea}} = 6000 \text{ W}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

\dot{Q} chimenea = 6 kW

4.2.5 Pérdidas de calor en los humos.

Asumiendo que las propiedades de los gases de combustión se pueden aproximar a las del aire, se puede obtener del EES las entalpías específicas de acuerdo a la temperatura de los gases y del ambiente:

h_1 (caliente) = 657.1 kJ/kg

h_2 (frio) = 297.6kJ/kg

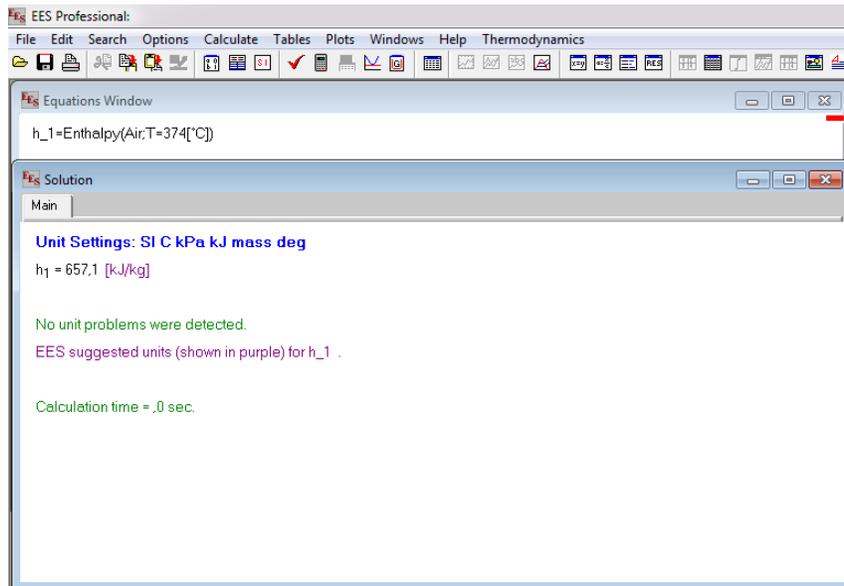


Figura 23. Cálculo de la entalpía de los gases de combustión (aproximados como aire) con el programa EES.

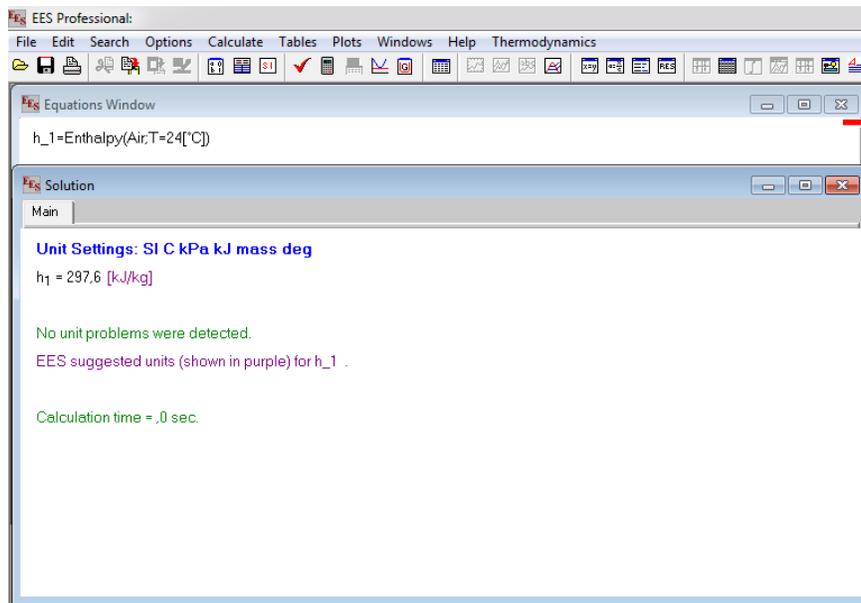


Figura 24. Cálculo de la entalpía del aire a temperatura ambiente con el programa EES.

$$\dot{Q} = \dot{m} \times \Delta h = 1.223 \text{ kg/s} \times (h_2 - h_1) = 1.223 \text{ kg/s} \times (657.1 - 297.6) \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q} = 1.223 \text{ kg/s} \times 359.5 \text{ kJ/kg}$$

$$\dot{Q} = 439.66 \text{ kW}$$

4.2.6 Pérdida de calor parte inferior horno cubilote.

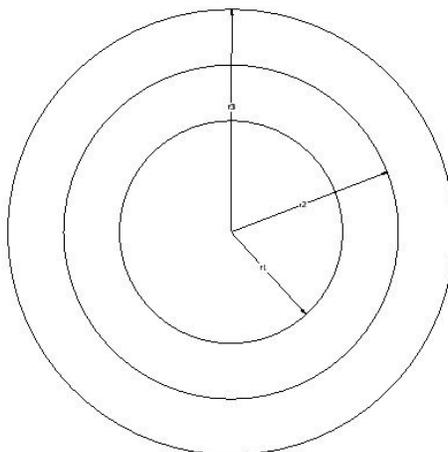


Figura 25. Corte de la sección cilíndrica de la zona inferior del horno cubilote

 Institución Universitaria	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Entre r_1 y r_2 el material de relleno es barro refractario, mientras que entre r_2 y r_3 el material es lámina de acero.

$$L = 0.89 \text{ m}$$

$$r_1 = 0.43 \text{ m}$$

$$r_2 = 0.635 \text{ m} - 0.127 \text{ m} \quad r_2 = 0.508 \text{ m}$$

$$r_3 = 0.635 \text{ m}$$

$$R_1 = \frac{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)}{2\pi K_1 L} \quad R_1 = \frac{\ln\left(\frac{0.508 \text{ m}}{0.43 \text{ m}}\right)}{2\pi\left(2.87 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.89 \text{ m})} \quad R_1 = \frac{0.24 \text{ m}}{2\pi\left(2.87 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.89 \text{ m})} \quad R_1 = \frac{0.166 \text{ m}}{16.04 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}} \quad R_1 = 0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_2 = \frac{\ln\left(\frac{r_3}{r_2}\right)}{2\pi K_2 L} \quad R_2 = \frac{\ln\left(\frac{0.635 \text{ m}}{0.508 \text{ m}}\right)}{2\pi\left(45.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}\right)(0.89 \text{ m})} \quad R_2 = \frac{0.223 \text{ m}}{253.3 \frac{\text{W}}{\text{m}^\circ\text{C}}} \quad R_2 = 8.803 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$A_3 = 2\pi r_3 L \rightarrow A_3 = 2\pi (0.635 \text{ m})(0.89 \text{ m}) \rightarrow A_3 = 3.55 \text{ m}^2$$

$$R_{\text{total}} = R_1 + R_2$$

$$R_{\text{total}} = 0.01 \text{ }^\circ\text{C/W} + 8.803 \times 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$R_{\text{total}} = 0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}$$

$$\dot{Q} = \frac{T_1 - T_2}{R_{\text{total}}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1420^\circ\text{C} - 88.6^\circ\text{C}}{0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}}$$

$$\dot{Q} = \frac{1331.4^\circ\text{C}}{0.01 \text{ }^\circ\text{C/W}}$$

$$\dot{Q} = 133140 \text{ W}$$

$$\dot{Q} = 133.1 \text{ kW}$$

4.2.7 Balance energético.

$$\dot{Q}_{\text{combustible}} - \dot{Q}_{\text{fusión}} - \dot{Q}_{\text{pérdidas}} = 0$$

$$1235 \text{ kW} - 433.3 \text{ kW} - 801.7 \text{ kW} = 0$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.8 Cálculo de eficiencia de primera ley.

$$\text{Eficiencia} = \frac{\dot{Q}_{\text{fusión}}}{\dot{Q}_{\text{combustión}}} = \frac{433.3 \text{ kW}}{1235 \text{ kW}} = 0.35$$

$$\text{Eficiencia} = 35\%$$

NOTA: La eficiencia es muy baja y hay mucha pérdida de calor.

4.2.9 Sumatoria de pérdidas de calor de horno de cubilote.

Si se suman las pérdidas de calor por las paredes en la zona de fusión, por la chimenea y por la parte inferior del horno se obtiene:

$$\Sigma \dot{Q} = 83 \text{ kW} + 6 \text{ kW} + 439.66 \text{ kW} + 133.1 \text{ kW}$$

$$\Sigma \dot{Q} = 661.76 \text{ kW}$$

$$\dot{Q}_{\text{pérdidas de acuerdo al balance de primera ley}} - \Sigma \dot{Q} = 801.7 \text{ kW} - 661.76 \text{ kW} = 139.94 \text{ kW}$$

Con la anterior formula se estiman las pérdidas de calor que no se calcularon, las cuales son la escoria del horno cubilote que es aproximadamente 300 kg por tonelada, las pérdidas de calor por el piso, las pérdidas de calor por el agua, las infiltraciones de aire y otras pérdidas no tenidas en cuenta y que son difíciles de calcular.

4.2.10 Emisiones contaminantes de horno cubilote.

De acuerdo a la calculadora FECOC de la unidad de planeación minero energética –UPME- de Colombia (Unidad de planeación minero energética de Colombia, UPME), para carbón de Cundinamarca:

$$\text{Factor de emisión CO}_2 = \frac{75915.075 \text{ kg CO}_2}{\text{TJ}}$$

$$\text{Factor de emisión SO}_2 = \frac{578.8202 \text{ kg SO}_2}{\text{TJ}}$$

Por tanto:

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

- Cálculo de emisiones de CO₂ = $\frac{1.56\text{GJ}}{1000\text{G}} \times \frac{75915.075 \text{ kg CO}_2}{\text{TJ}} = 118.42 \text{ kg CO}_2$
- Cálculo de emisiones SO₂ = $\frac{1.56\text{GJ}}{1000\text{G}} \times \frac{578.8202 \text{ kg SO}_2}{\text{TJ}} = 0.903 \text{ kg SO}_2$

Por cada hora de operación el horno cubilote libera 118.42 kg CO₂ y 0.903 kg SO₂ a la atmósfera.

Tabla 6. Límites de emisión de acuerdo a la resolución 909 del 5 de junio del 2008 del ministerio del medio ambiente. (Ministerio del medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial, 2008)

Contaminante	Flujo del contaminante (kg/h)	Estándares de emisión admisibles de contaminantes (mg/m ³)	
		Actividades industriales existentes	Actividades industriales nuevas
Material Particulado (MP)	≤ 0,5	250	150
	> 0,5	150	50
Dióxido de Azufre (SO ₂)	TODOS	550	500
Óxidos de Nitrógeno (NO _x)	TODOS	550	500
Compuestos de Fluor Inorgánico (HF)	TODOS	8	
Compuestos de Cloro Inorgánico (HCl)	TODOS	40	
Hidrocarburos Totales (HC _T)	TODOS	50	
Dioxinas y Furanos	TODOS	0,5*	
Neblina Ácida o Trióxido de Azufre expresados como H ₂ SO ₄	TODOS	150	
Plomo (Pb)	TODOS	1	
Cadmio (Cd) y sus compuestos	TODOS	1	
Cobre (Cu) y sus compuestos	TODOS	8	

* Las Dioxinas y Furanos se expresan en las siguientes unidades: (ng-EQT / m³), EQT: Equivalencia de Toxicidad.

De acuerdo a las pruebas isocinéticas el material particulado es aproximadamente 486mg/m³, con un flujo de 0.6 kg/h. Está por encima de la norma y actualmente se está trabajando en la empresa para reducir este impacto ambiental. Por otra parte el dióxido de azufre es aproximadamente 9 mg/m³ la cual está por debajo de lo que dice la norma. Finalmente los óxidos de nitrógeno son aproximadamente 30 mg/m³ la cual está por debajo de lo que dice la norma.

4.2.11 Costo económico de operación del horno cubilote.

$$1160\text{kg} \times \frac{\$375}{1 \text{ kg carbón}} = \$435000$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Este horno trabaja con 7 operarios para que su funcionamiento sea bien productivo y eficiente.

- Operario de horno cubilote: está pendiente de sostener la cuchara para que la colada se vacíe en ella.
- Clasificador de chatarra: se encarga de separar la materia prima para que la chatarra que se va a fundir no esté contaminada, además va cargando el horno.
- Aporcador: se encarga de aportar arena al borde de los moldes para que los gases cuando se esté vaciando la colada no los reviente.
- Vaciador: se encarga de guiar el puente grúa con la cuchara para vaciar la colada en los moldes.
- Chuzador: se encarga de tener un eje que en la punta tiene barro que sirve para tapar la piquera por donde sale la colada.
- Escoriador: este operario está poniendo cuidado cuando el vaciador vierte la colada en los moldes no se le valla escoria a las piezas.
- Arreglador: este operario se encarga de cada vez que el horno cubilote sea utilizado remueve el barro refractario y pone nuevo barro para otro día de trabajo.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

4.2.12 Certificados de calidad materiales refractarios/aislantes del horno.

Tabla 7. Certificado de calidad carbón coque de fundición (planta la esperanza)

DETERMINACION	COMO SE RECIBE	BASE SECA	METODO ASTM
HUMEDAD TOTAL %	0.34	0	D 3302/D3302M – 15
CENIZAS %	6.75	6.77	D 3174 – 12
MATERIA VOLATIL %	1.09	1.09	D 3175 – 11
CARBONO FIJO %	91.83	92.14	D 3172 – 13
AZUFRE %	0.48	0.84	D 4239 – 14 E 2
PODER CALORIFICO kcal/Kg	7327	7352	D 5865 – 13

Descripción física: material poroso de color gris lustroso de superficie irregular

Instrucciones de uso: se utiliza para fundición de hierro en el horno cubilote. Para encenderlo se debe utilizar una fuente alterna de energía como madera, leña o gas.

Imagen fotográfica



	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 8. Certificado de calidad de barro refractario

Características Técnicas		Imagen Fotográfica
Componentes	SiO ₂ 83.60% Mínimo Al ₂ O ₃ 0.2% Máximo TiO ₂ 0.1% Máximo CaO 0.3% Máximo MgO 0.3% Máximo ALCALIS 0.5% Máximo H ₂ O 12.0% Máximo	
Descripción física: Masa apisonable granulosa, húmeda al tacto de color grisáceo.		
Instrucciones De Uso: masa utilizada para revestimiento de hornos cubilotes y cucharas, para resistir altas temperaturas en fundición. Se empaqueta en bolsas de polipropileno reutilizadas provenientes de la industria plástica		

4.3 Comparativa de costos de los dos hornos.

4.3.1 Costo de mantenimiento horno cubilote.

Precio del barro refractario es \$348 x kg

En cada mantenimiento se gasta 480 kg de barro refractario.

$$480\text{kg} \times \frac{\$348}{1\text{kg}} = \$ 167040 \text{ COP}$$

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

En 2017 un mes de salario de un empleado le cuesta a la empresa \$1240246 COP x mes; es decir por día \$ 41341 COP

El horno de cubilote se le hace mantenimiento en un turno de trabajo el cual cuenta la mano de obra \$41341 COP

Nota: el horno de cubilote se le debe de hacer mantenimiento después de cada fundición y lo hace un empleado.

4.3.2 Costo de mantenimiento de horno de inducción.

Costo del blue pack \$ 6175 x kg

Costo del dri vibe \$ 2625 x kg

En cada mantenimiento se gasta 20 kg de blue pack y 100 kg de dri vibe.

$$20\text{kg} \times \frac{\$ 6175}{1 \text{ kg}} = \$ 123500 \text{ COP}$$

$$100\text{kg} \times \frac{\$ 2625}{1 \text{ kg}} = \$ 262500 \text{ COP}$$

Costo de insumos del horno de inducción.

$$\$123500 \text{ COP} + \$262500 \text{ COP} = \$ 386000 \text{ COP}$$

El horno de inducción se le hace mantenimiento en un turno de trabajo el cual cuesta la mano de obra \$41341 COP

Nota: este mantenimiento dura más, ya que es para 120 coladas y el mantenimiento lo hace un solo operario aproximadamente una vez por mes.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

Tabla 9. Comparativo de los costos de los hornos

Costo	Horno de inducción	Horno cubilote
Equipo e instalación	\$1000000000 COP(costo 2015)	\$30000000 COP(costo 1985)
Materiales para mantenimiento	\$386000 COP (costo mensual)	\$167000 COP (costo x cada uso)
Mano de obra requerida en el mantenimiento	\$41341 COP (costo mensual, un solo operario)	\$41341 COP (costo x cada uso, un solo operario)
Mano de obra requerida en operación	\$165364 COP (costo x día,4 operarios)	\$289387 COP (costo x cada uso, 7 operarios)
Combustible	\$1251855 (costo x día)	\$435000 (costo x cada uso)

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

5. CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES Y TRABAJO FUTURO

Conclusiones

Se detectó que el horno cubilote es más económico su funcionamiento, pero su eficiencia es más baja. Se calculó que la eficiencia del horno cubilote es de un 35%, pero el costo de carbón que se consume es de \$435000 COP por cada día de trabajo.

Con el horno de inducción se detectó que es más costoso su funcionamiento, pero su eficiencia es más alta. Se obtuvo que la eficiencia del horno de inducción que es de 60%, pero el costo de energía es bastante alto para un día de operación: \$1251855 COP.

Con el horno de inducción también podemos ver que en la mano de obra bajó más ya que se necesitan 4 operarios para su óptimo desempeño mientras que en el horno de cubilote se necesitan 7 operarios para que su funcionamiento sea el adecuado.

El impacto ambiental del horno de inducción es mínimo porque es eléctrico mientras que el de carbón si tiene emisiones contaminantes. Para contribuir a disminuir el impacto ambiental en el valle del aburra se debería usar siempre el horno de inducción.

La empresa FINSA S.A.S nos da la información de que el horno cubilote costo en el año 1995 la suma de \$30000000 COP y el horno de inducción costo en el año 2015 la suma de \$1000'000.000 COP. Nos damos cuenta que el horno de cubilote es más barato que el horno de inducción, pero su impacto ambiental es alto en comparación con el de inducción.

El horno cubilote sale más caro en mantenimiento que el horno de inducción, porque el horno de cubilote se le debe cambiar el refractario cada vez que se utiliza y esto cuesta \$167000 COP, el horno de inducción cuesta el refractario \$386000 COP y dura aproximadamente un mes.

El horno cubilote es más caro en mano de obra de mantenimiento porque cada vez que se utiliza se le debe hacer mantenimiento (en promedio una vez por semana) y lo hace un solo operario, esto cuesta \$41341 COP, en cambio con el horno de inducción también lo hace un operario, pero el mantenimiento se hace aproximadamente cada mes y cuesta \$41341 COP.

La mano de obra requerida en operación es más económica con el horno de inducción, porque necesita 4 operarios que cuestan \$165364 COP para su desempeño óptimo, con el horno de

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

cubilote sale más caro, porque necesita 7 operarios que cuestan \$289387 COP para su desempeño óptimo.

En combustible sale más costoso el horno de inducción ya que la energía que necesita para su funcionamiento en un día de trabajo cuesta \$1251855 COP, en cambio el horno de cubilote un día de consumo de combustible cuesta \$435000 COP.

Recomendaciones

Se recomienda llevar un registro detallado de las temperaturas externas de los hornos ya que no se cuentan con estos datos en caso de una auditoria energética. Estos datos cuando se necesitan se deben medir con termopar tipo k, con un registro de estas temperaturas plasmadas en un informe diario nos da una información de que eficiente son los hornos y que perdidas de calor tienen.

Trabajo futuro

Se puede hacer un estudio de mejora de eficiencia de los hornos ya que en el alcance de este trabajo no estaba contemplado proponer mejoras. El horno que tiene mayor potencial de ahorro en el horno cubilote porque es el que tiene la eficiencia más baja. Se puede hacer también un estudio en el que se analice el impacto de la contaminación térmica en el medio ambiente cercano a las instalaciones de la planta.

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

REFERENCIAS

- Union temporal INCOMBUSTION. (2016). *Diagnóstico energético en los sectores industriales colombianos*. Medellín.
- Fusión: Horno de Cubilote*. (22 de abril de 2013). Recuperado el 26 de septiembre de 2016, de <http://fundicionymetales.blogspot.com.co/>
- Electroheatinduction. Induction melting and heating solutions*. (2016). Obtenido de <http://www.electroheatinduction.com/>
- Aristizábal Sierra, R., Mejía, H. D., Silva, C., Pineda, D. A., & Rojas, M. (Marzo de 2006). Modelo matemático para los fenómenos de combustión en un horno de cubilote. *Revista Facultad de Ingeniería Universidad de Antioquia*(36), 70-84.
- Botero, F. (Mayo-Julio de 2011). *Hornos de inducción (metal actual)*. Obtenido de http://www.metalactual.com/revista/20/maquinaria_hornos.pdf
- Cabello del Solar, M. (2012). *Horno cubilote*. Obtenido de <https://es.wikipedia.org>
- Cengel, Y. A., & Boles, M. A. (2012). *Termodinámica* (7ma ed.). McGraw Hill.
- Cengel, Y. A., & Ghajar, A. J. (2011). *Transferencia de calor y masa. Fundamentos y aplicaciones*. (4ta ed.). McGraw Hill.
- De Pablo Reina, J. J. (2013-2014). Auditoria energética de un horno de temple para piezas de vidrio. *Universidad de la Rioja*, 1-142.
- Gordillo Muñoz, G. A. (2005). *Evaluación de pérdidas energéticas en la planta de fundición de la empresa de herrajes fantaxias Ltda*. Bucaramanga: Universidad Industrial de Santander.
- Lazzarin, R. m., & Noro, M. (2015). Energy efficient opportunities in the production process of cast iron foundries: an experience in Italy. *Applied Thermal Engineering*, 509-520.
- Ministerio del medio ambiente, vivienda y desarrollo territorial. (2008). *Resolución 909 del 5 de junio*. Colombia.
- Unidad de planeación minero energética de Colombia, UPME. (s.f.). *Calculadora FECOC 2016*. Obtenido de http://www.upme.gov.co/Calculadora_Emisiones/aplicacion/calculadora.html

	INFORME FINAL DE TRABAJO DE GRADO	Código	FDE 089
		Versión	03
		Fecha	2015-01-22

FIRMA ESTUDIANTES Wberimar Flores.

FIRMA ASESOR [Signature]

SEGUNDO ENVÍO INFORME FINAL PARA EVALUACIÓN
8:00 PM FECHA ENTREGA: 16/03/2017

FIRMA COMITÉ TRABAJO DE GRADO DE LA FACULTAD _____

RECHAZADO ___ ACEPTADO ___ ACEPTADO CON MODIFICACIONES ___

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____

FIRMA CONSEJO DE FACULTAD _____

ACTA NO. _____

FECHA ENTREGA: _____