



INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“DR. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD METALURGIA-ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO MECÁNICA

***BALANCE ENERGÉTICO DEL HORNO DE REDUCCIÓN
DE LA PLANTA PILOTO DEL CENTRO DE
INVESTIGACIONES DEL NÍQUEL.***

Tesis en opción al título de Ingeniero Mecánico

Autor: Jonathan Cobas Silot

Tutor: Dr.C. Ever Góngora Leyva.

**Moa – 2017
“Año 58 de la Revolución”**

Declaración de autoridad

Yo: Jonathan Cobas Silot

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, el cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

Jonathan Cobas Silot

Dr. C. Dr. Ever Góngora Leyva.

Agradecimientos

A Díos por darme las fuerzas necesarias para lograr que todo este trabajo cumpliera su fin.

A todos mis profesores por los conocimientos transmitidos durante el desempeño de mi carrera.

A mi tutor por confiar en mí en la realizacion de este trabajo el Dr.C. Ever Góngora Leyva.

A mis familiares que me apoyaron en los momentos de mi vida en que más lo necesitaba.

A mis amigos que siempre creyeron en mi.

A los que de una forma u otra me apoyaron y ayudaron en la realizacion de este trabajo.

A la Revolución, por darme la oportunidad de convertirme en profesional .

A todos Muchas gracias.

Dedicatoria

Quiero dedicar este trabajo a mis familiares.

***A mi madre y padre: Nancy Silot Paumier y Ernesto
Cobas Pelegrín por su amor eterno.***

***A mis amigos que estuvieron a mi lado durante los 5
años de mi carrera.***

***A nuestra Revolución, por las posibilidades que me
ofrece.***

RESUMEN

En este trabajo se presenta un balance de materia y energía que se realizó en el horno de reducción de la Planta Piloto del centro de investigaciones de la laterita con el objetivo de conocer donde ocurren las mayores pérdidas de energía en este ya que ya que los mayores consumos de combustibles en el proceso carbonato-amoniaco ocurren precisamente en este equipo.

Para ello se tomaron los datos de la última prueba realizada en la planta piloto, en la que se procesó mineral del yacimiento Cupey representativos de la alimentación de la planta industrial durante los primeros cinco años.

Este balance nos permite estudiar la factibilidad de diferentes variantes que permitan la disminución o utilización de estas pérdidas para lograr que el proceso sea más económico.

Las propuestas que se evalúan son: utilización de los gases de salida del horno de reducción en la cámara de secadero y la sustitución del aire de la post-combustión por el aire que sale por el eje central. Mediante la valoración económica se demuestra que estas variantes son factibles.

ABSTRACT

You encounter a balance of matter and energy that came true in the little tinsmith's oven of reduction of The Pilot plant of the center of investigations for the sake of knowing where the bigger losses of energy in this happen in this work right now than right now than the bigger consumptions of fuels in the process ammoniacal-carbonate they happen precisely in this team.

They took the data of last proof accomplished in the pilot plant for it, in her than himself mineral process of the deposit Cupey representative of the nutrition of the industrial plant during the first five years.

This balance allows us going into the feasibility of different variants that the decrease or utilization of these losses to achieve enable that the process be more economic.

The proposals that are evaluated are: Utilization of the gases of exit of the oven of reduction that leaves for the central axis in the camera of drying room and the substitution of the air of the post-combustion for air. It is proven that by means of the cost-reducing assessment these variants are feasible.

Tabla de contenido

INTRODUCCIÓN	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO	¡Error! Marcador no definido.
1.1. Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
1.2. Normas de investigación y metodología empleada	¡Error! Marcador no definido.
1.3. Descripción del proceso tecnológico	¡Error! Marcador no definido.
1.4. Descripción de la instalación objeto de estudio	¡Error! Marcador no definido.
1.5. Revisión bibliográfica.....	¡Error! Marcador no definido.
1.6. Conclusiones del Capítulo I.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	¡Error! Marcador no definido.
2.1. Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
2.2. Cálculo de la combustión del petróleo tecnológico	¡Error! Marcador no definido.
2.3. Cálculo de los gases del petróleo aditivo ..	¡Error! Marcador no definido.
2.4. Cálculos de la reducción	¡Error! Marcador no definido.
2.5. Combustión en el hogar cuatro.....	¡Error! Marcador no definido.
2.6. Cálculo general de los gases de salida del horno:	¡Error! Marcador no definido.
2.7. Balance energético del horno de reducción	¡Error! Marcador no definido.
2.8. Cálculo de los índices de entrada y salida de los gases del horno..	¡Error! Marcador no definido.
Cálculo de los índices de entrada:	¡Error! Marcador no definido.
2.9. Conclusiones del Capítulo II.....	¡Error! Marcador no definido.
CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL	¡Error! Marcador no definido.
3.1. Introducción.....	¡Error! Marcador no definido.
3.2. Estudio de la variante # 1	¡Error! Marcador no definido.
3.3. Estudio de la variante # 2	¡Error! Marcador no definido.
3.4. Análisis económico.....	¡Error! Marcador no definido.
3.4.1. Valoración económica de la variante # 1	¡Error! Marcador no definido.
3.4.2. Valoración económica de la variante # 2	¡Error! Marcador no definido.
3.5. Impacto ambiental	¡Error! Marcador no definido.

3.5.1. Influencia del polvo en el medio ambiente	¡Error!	Marcador	no definido.
3.5.2. Influencia del ruido en el medio ambiente	¡Error!	Marcador	no definido.
3.6. Conclusiones del capítulo III	¡Error!	Marcador	no definido.
CONCLUSIONES GENERALES	¡Error!	Marcador	no definido.
RECOMENDACIONES	¡Error!	Marcador	no definido.
BIBIOGRAFIAS	¡Error!	Marcador	no definido.
ANEXOS	¡Error!	Marcador	no definido.

INTRODUCCION

Los planes de desarrollo del níquel en Cuba permiten la realización de una serie de estudios e investigaciones de las instalaciones existentes y de las nuevas a explotar, con el objetivo de obtener el producto deseado mediante un proceso eficiente y económico.

El Centro de Investigaciones del Níquel Capitán “Alberto Fernández Montes de Oca” se encuentra ubicado al norte del yacimiento de mineral en Punta Gorda, Carretera Moa Baracoa km 5 ½, provincia Holguín.

Este integra entre sus partes fundamentales una planta piloto destinada al estudio del proceso carbonato-amoniaco, en esta se han realizado diferentes investigaciones con vista al perfeccionamiento del mismo.

El presente trabajo plantea la realización de un balance material y térmico en el horno de reducción de dicha planta que permita identificar donde ocurren las mayores pérdidas de energía y mediante el análisis de los resultados hacer un estudio de las posibles vías de utilización o disminución de estas, lo que permita hacer más económico el proceso.

Para esto se tomaron los datos de la última prueba realizada en la planta en la que se procesaron los minerales del yacimiento Cupey.

Situación problemática

Los hornos de reducción del Centro de Investigaciones del Níquel Capitán “Alberto Fernández Montes de Oca” son punto clave para el procesamiento del mineral por ello se hace necesario el estudio de estos equipos para tener conocimiento de sus problemas y así erradicarlos. Estos están presentando problemas en su eficiencia energética producto de la mala combustión en su cámara que lleva a un elevado consumo de combustible. Todo lo anterior repercute que, en la mayoría de los casos, estos rechazos afecten el medio ambiente y la economía del país.

A partir de las deficiencias expresadas se define como **problema de la investigación**: baja eficiencia energética en los Hornos de Reducción del Centro de Investigaciones del Níquel Capitán “Alberto Fernández Montes de Oca”.

Teniendo en cuenta la problemática planteada y el problema de la investigación se define como **objeto de estudio**: El proceso de reducción del mineral en el horno de la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel Capitán “Alberto Fernández Montes de Oca”.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis científica**: Es posible determinar mediante un balance de masa y energía las mayores pérdidas que ocurren durante el proceso de reducción en los hornos obteniendo así, de una manera simplificada los valores de estas para proponer posibles soluciones al problema antes planteado.

En correspondencia con la hipótesis planteada se define como **objetivo general del trabajo**: Determinar el valor de las pérdidas energéticas a través de los cálculos de masa y energía respectivamente.

Para dar cumplimiento al objetivo general de la investigación se definen los siguientes **objetivos específicos**:

1. Establecer los procedimientos para determinar los valores de las composiciones químicas de los gases.
2. Realizar el análisis gráfico de los resultados de las mediciones realizadas.

Para lograr el cumplimiento de los objetivos propuestos, se plantean las siguientes **tareas**:

1. Obtener datos, información y conocimiento a partir de materiales impresos y digitales de fuentes académicas y empresariales.
2. Obtener mediante mediciones, datos sobre indicadores relacionados con los procesos de transferencia de calor y las reacciones que ocurren en el objeto de investigación.
3. Determinar las ecuaciones que describan el procedimiento de cálculo para la evaluación del proceso que se estudia.
4. Realizar el balance de masa y energía al objeto de estudio a partir del procedimiento descrito.
5. Determinar la valoración técnico-económica y el impacto al medio ambiente de a partir de la evaluación realizada.

CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

1.1. Introducción

La tecnología carbonato-amoniaco tiene entre sus principales deficiencias el alto consumo energético, especialmente en las operaciones de secado, molienda y reducción del mineral, las cuales consumen más del 60 % de la energía total del proceso tecnológico.

La energía térmica necesaria para la transformación correspondiente al proceso de extracción de níquel se obtiene en los hornos de reducción. La reducción del mineral mediante el uso de agentes reductores gaseosos es un fenómeno químico que se rige por las leyes que gobiernan las reacciones químicas. Para conocer la cantidad de energía que se necesita para procesar el mineral es preciso realizar un balance térmico en el que se tengan en cuenta los diferentes índices de entrada y salida del calor.

El balance térmico es calculado para un determinado tiempo de trabajo del horno, para una hora, un día, tiempo de procesamiento de 100 kg de mineral entre otras variantes. Este da la oportunidad de conocer el consumo de energía de un proceso y localizar los puntos donde las pérdidas se sitúan por encima de los límites permisibles, y el comportamiento de diversas reformas que se introducen en el proceso, renovar o reparar algún equipo, también existe la posibilidad de realizar un estudio económico, además, permite al técnico mantener un seguimiento detallado del proceso y un óptimo entre la cantidad de producto y la energía empleada, el cual genera un mejor aprovechamiento energético y por ende hace más económico el proceso.

En el presente capítulo se establece como **objetivo**: exponer los fundamentos teóricos de los procesos de transferencia de calor y de masa en hornos metalúrgicos.

En los hornos de reducción existen pérdidas de energía en diversos puntos fundamentales que se deben tener en cuenta a la hora de realizar el análisis de los resultados del balance, ya que si no se encuentran dentro de los límites establecidos provocan baja eficiencia térmica.

Entre estos puntos se encuentran:

- Temperatura de los gases de la chimenea
- Óxido de carbono de los gases de la chimenea
- Aire de los quemadores que no se precalientan
- Pérdidas de calor por radiación
- Temperatura del mineral reducido
- Calor del aire que circula por el eje central
- El mineral que ha consumido petróleo y se pierde

En la práctica se han realizado diferentes trabajos con vista a la utilización de esta energía que se pierde, fundamentalmente se ha trabajado en el uso del calor de los gases de reducción en el secado del mineral. En la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se utiliza esta variante, dándose a conocer por el departamento técnico de ésta un informe donde se expone el ahorro de combustible obtenido. También se propone el aprovechamiento del calor sensible del aire que circula por el eje central del horno en labores de secado o sustituyendo el aire frío que se inyecta en los hogares cuatro y seis del horno.

En el horno perteneciente al Centro de Investigaciones del Níquel Capitán “Alberto Fernández Montes de Oca” no se ha estudiado la posibilidad de aprovechar el calor sensible producto del enfriamiento del eje central del horno para mejorar la eficiencia de la instalación, por lo que este trabajo permitirá analizarlas y en caso de que sean factibles proponer las que resulten ventajosas, además, estudiar el posible precalentamiento del aire que entra en el quemador del horno, este problema fue resuelto en las cámaras Pryor de los hornos con la presencia de un serpentín exterior colocado al quemador por el que pasa el aire antes de ser introducido para la combustión.

Balance material

Un balance de materia en un proceso industrial es una contabilidad exacta de todos los materiales que entran, salen, se acumulan o se agotan en el curso de un intervalo de tiempo de operación dado. Es de este modo una expresión de

la ley de conservación de la masa. Para los cálculos es necesario conocer si tienen lugar reacciones químicas, si esto ocurre se hace necesario desarrollar el balance basado en los elementos químicos, o sobre radicales compuestos o sustancia que no se alteren, descompongan o formen, en el proceso.

1.2. Normas de investigación y metodología empleada

Para realizar la investigación de todos los componentes de la carga, su composición físico-química, el consumo de petróleo del horno, así como las temperaturas del horno se tomaron los datos de la prueba realizada en la planta piloto con el mineral perteneciente al yacimiento Cupey de las Camariocas.

Se procesó una mezcla de limonita y serpentina con predominio de la primera en una proporción de tres partes másicas por una.

Parámetros de operación que se controlan en el horno:

- Granulometría del mineral seco: 84 % de - 0,074 mm.
- Humedad del mineral de alimentación: 2 a 3 %.
- Alimentación al horno: 1 040 kg/h.
- Aireación en cámara: 62 %.
- % óxido de carbono en cámara: 12 a 13.
- Postcombustión en los hogares 4 y 6.
- Reacción dióxido de carbono/óxido de carbono en el hogar 10: 1,2 a 1,3.
- Temperatura del mineral en la descarga del transportador sinfín del horno.
- Temperatura del mineral en la descarga del enfriador de mineral del horno.
- Temperatura del eje central.
- Presión del horno en los hogares 0 y 16 (mm de agua).
- Flujo del petróleo reductor (aditivo) a la mezcladora.

- Amperaje del eje central y de los equipos periféricos fundamentales.

Se realizaron análisis de gases de la cámara del horno empleando un equipo Orsat, que incluía pipeta de combustión para la determinación de dióxido de carbono (CO_2), oxígeno (O_2), monóxido de carbono (CO), hidrógeno (H_2), metano (CH_4). Se tomaron cada una hora los parámetros fundamentales de la combustión como son: temperatura de la cámara, flujo de petróleo al quemador, presión de petróleo, temperatura del aire de combustión y presión del aire a la entrada del quemador.

El método de análisis químico empleado fue el de Fluorescencia de Rayos-X. Los elementos químicos analizados fueron: *Ni* (níquel), *Co* (cobalto), *Fe* (hierro), *Mn* (manganeso), Cr_2O_3 (trióxido de cromo II), SiO_2 (dióxido de silicio), Al_2O_3 (alúmina), y MgO (periclasa).

En correspondencia con el perfil de temperatura del horno, a continuación, se ofrece una propuesta de transformaciones físico-químicas de los principales minerales, ordenadas en tres zonas hipotéticas del horno, sobre la base de los resultados del análisis térmico de los minerales presente en el yacimiento Punta Gorda.

1.3. Descripción del proceso tecnológico

El grupo canadiense Surveyer Neningen and Chenevert desarrolló un diseño conceptual para una planta piloto que sería construida en Punta Gorda, Cuba, para las investigaciones relacionadas con el tratamiento de las Lateritas con las expectativas siguientes:

1. Determinación de condiciones óptimas para el procesamiento de nuevos yacimientos en plantas comerciales existentes y también en nuevas plantas proyectadas.
2. Pruebas y evaluaciones alternativas de diversificación con el objetivo de garantizar eficiencia, recuperación, economía y conservación de energía.
3. Obtener información para nuevos diseños y modificaciones relacionadas con el sistema de control, etapas de procesos y equipos.

El diseño de la Planta Piloto concibió cinco áreas fundamentales para las investigaciones relacionadas con el procesamiento del mineral utilizando la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal, basada en el proceso CARON:

- Almacenaje del Mineral Húmedo, Secado y Molienda
- Reducción
- Lixiviación y Lavado
- Precipitación de cobalto
- Destilación de licor y recuperación de amoniaco

A pesar de la planta haber sido diseñada para estas cinco áreas, actualmente cuenta solo con las tres primeras.

Como resultado de las operaciones que se llevan a cabo, el mineral se transforma obteniéndose un producto de níquel y cobalto, separado del resto de los elementos que conforman el mineral. A continuación, se describen las áreas de la planta piloto.

Almacenaje del mineral húmedo, secado y molienda

Esta tecnología comienza con la extracción del mineral en las minas a cielo abierto de los yacimientos de níquel de Punta Gorda, con una ley aproximadamente de 1,3 % de níquel, el cual es tratado con una buena planificación para facilitar su homogenización, siendo transportado hasta una plazoleta a cielo abierto que existe en la planta.

Luego se traslada a una plazoleta techada para su alimentación al proceso. Utilizando un cargador frontal, la mezcla se deposita en el tolve CF-1 donde se produce un cribado preliminar, se separan del proceso las porciones mayores de 300 mm como rechazo o son reducidas manualmente e incorporadas al mismo. Una vez homogeneizado, el mineral es enviado al proceso de secado mediante el transportador de banda CB-1, reduciéndose en éste la humedad hasta el valor apropiado y enviándose luego a la sección de molienda mediante transportadores de bandas.

El mineral seco es clasificado en la zaranda vibratoria en dos fracciones granulométricas. La más gruesa se reduce y luego se alimenta al molino y la fina va directo a él. El producto seco y fino proveniente del área de molienda se almacena en los silos mediante el elevador de Cangilones CE-2, conjuntamente con el polvo recuperado en el área de secado.

Horno de reducción

El mineral que se encuentra almacenado en los silos (Figura 1.1), pasa seguidamente al área de reducción en la cual utilizando monóxido de carbono (CO) como agente reductor se produce la transformación en la estructura del mismo, pasando el níquel, monóxido de carbono y parte del Hierro de sus formas combinadas a la metálica.

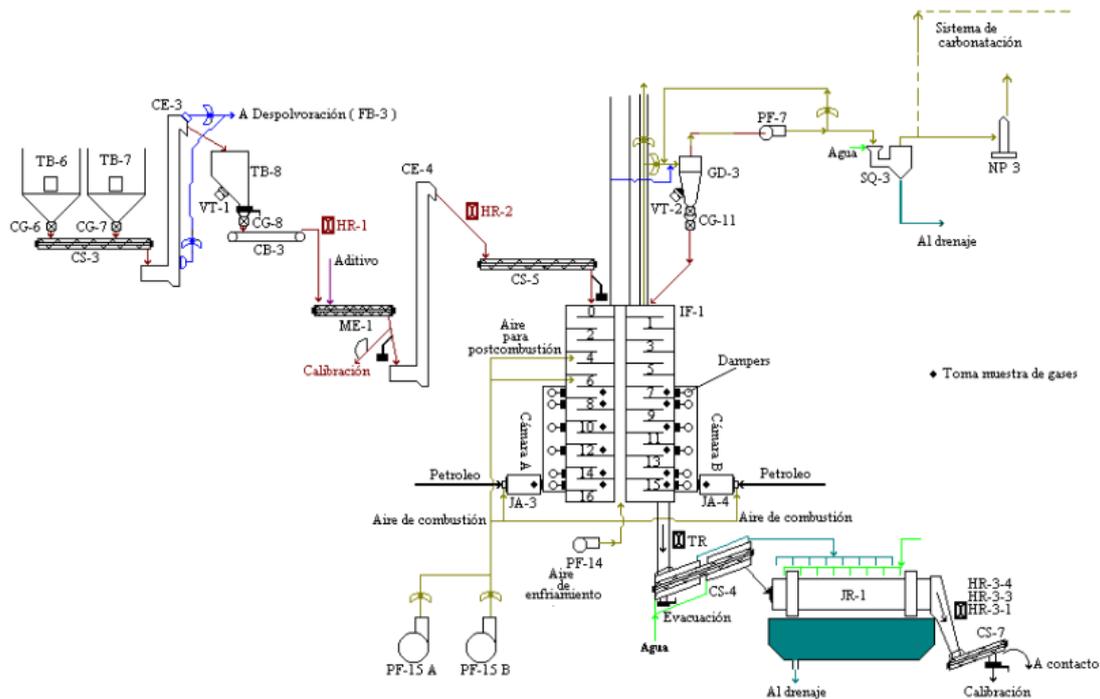


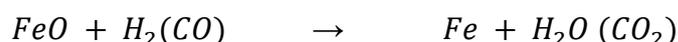
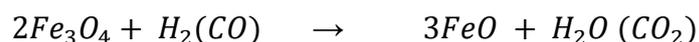
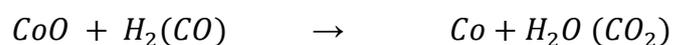
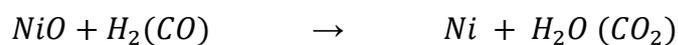
Figura 1.1. Esquema del flujo tecnológico de la planta Hornos de Reducción del Centro de Investigaciones del Níquel.

En esta parte se ha investigado la reducción con la adición de petróleo al mineral y se ha montado una instalación con este objetivo en la mezcladora, antes el mineral pasa por un sistema de pesaje continuo que posibilita contabilizarlo antes de ser alimentado al horno.

Una vez mezclado este producto pasa al horno de reducción vertical (cuya función es efectuar la reducción de los minerales hasta su estado metálico) donde se combina el factor temperatura y la acción química de los agentes reductores gaseosos para producir las transformaciones que deja preparado el mineral para pasar a la próxima fase.

La reducción se logra estableciendo un perfil de temperaturas dentro del horno y una concentración de gases reductores.

Durante la reducción del mineral tienen lugar gran cantidad de reacciones químicas que se muestran en las siguientes ecuaciones:



El mineral reducido se enfría pasando sucesivamente por un transportador sinfín y un enfriador rotatorio para luego ser descargado al tanque de contacto TT1 perteneciente al área de lixiviación.

Lixiviación y lavado

El mineral reducido procedente del enfriador rotatorio se descarga en el tanque de contacto de lixiviación donde se mezcla con el licor de recirculación de la segunda etapa de lixiviación y parte del licor producto, formando una pulpa que se envía a la primera etapa de lixiviación. El licor de esta etapa sale enriquecido en níquel y monóxido de carbono (licor producto) con diferentes usos investigativos.

En esta área se le extrae el níquel y monóxido al mineral reducido, utilizando como solución lixivadora el licor carbonato amoniacal (que contiene el 6 % de amoníaco y 3 % de ácido carbónico) en tres etapas de lixiviación y se lavan para recuperar el níquel disuelto. Este es un proceso de decantación a contracorriente con cinco etapas de lavado.

La planta dispone de almacenaje de soluciones, formada por ocho tanques de 50 m³ de capacidad, de ellos, tres poseen agitadores y pueden recibir licor fresco de 140 g/l de amonio y 70 g/l de dióxido de carbono.

1.4. Descripción de la instalación objeto de estudio

El mineral después de pasar por el proceso de transportación llega hasta el horno, el cual tiene como función la reducción de éste, que se logra estableciendo un perfil de temperaturas dentro del mismo y una concentración de monóxido de carbono como gases reductores. Para ello, el horno dispone de dos cámaras de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo y ductos en cada una de ellas que distribuyen los gases al interior del horno por los hogares 7, 8, 10, 12, 14 y 15.

El horno cuenta con un eje central al cual se le articulan cuatro brazos en cada hogar, que tienen dispuestos dientes que facilitan el traslado del mineral de un hogar a otro, cuyo movimiento se realiza en forma de zigzag ya que los hogares pares descargan por la periferia (16 puntos situados simétricamente) y los impares por el centro. Las cámaras se encuentran instaladas directamente al hogar quince y los gases suben a contracorriente con el mineral para favorecer la reducción en los lugares de caída de un hogar a otro.

La operación del horno se complementa con la introducción de aire a los hogares cuatro y seis para la postcombustión de los gases que no intervienen en las reacciones de reducción y así disminuir las concentraciones de ellos en la chimenea.

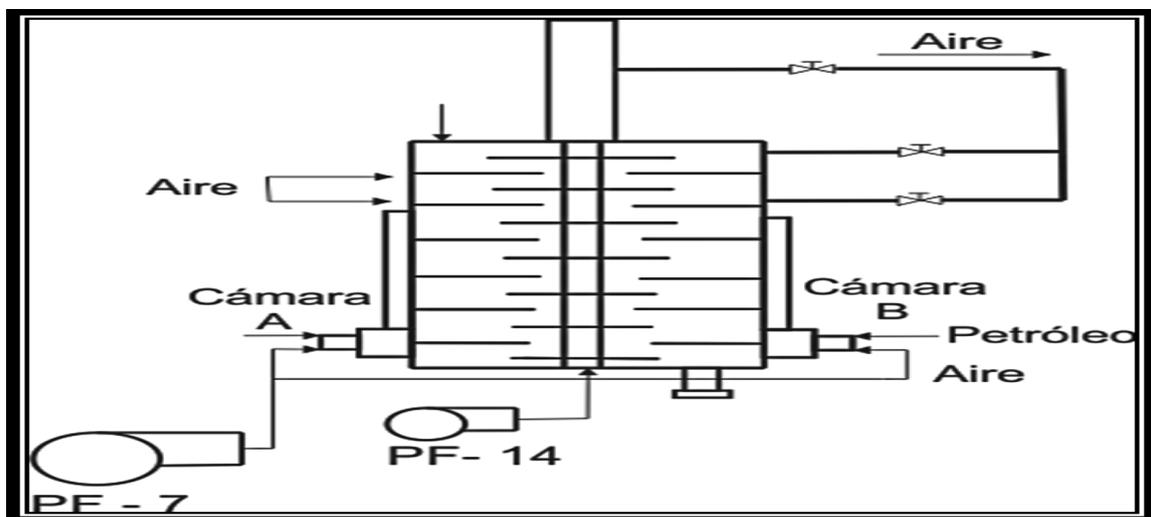


Figura 1.2. Imagen del Horno de Reducción del Centro de Investigaciones del Níquel.

Las condiciones de diseño del proceso son las siguientes:

- Dimensiones D x H, 2,51 x 11 m
- Número de hogares, 17
- Área efectiva, 25,73 m²
- Área por hogares pares, 1,41 m²
- Área por hogares impares, 1,51 m²

Construcción, regular, con aislamiento refractario interior que forman los hogares.

1.5. Revisión bibliográfica

Para la realización de este trabajo se realizó una búsqueda bibliográfica en las diferentes empresas del Níquel y en la universidad con el objetivo de adquirir y profundizar los conocimientos sobre el proceso CAROM y específicamente sobre el proceso de reducción que ocurre en el horno.

El estudio permitió conocer sobre otros trabajos que se han realizado anteriormente en las industrias referentes al tema y que sirvieron de base a este trabajo. Esto unido a los conocimientos adquiridos hizo posible la culminación de este trabajo.

Manual de operaciones de la planta piloto del Centro de Investigaciones del Níquel Capitán "Alberto Fernández Montes de Oca". 1997: Este trabajo permite conocer, además del proceso que ocurre en el horno, las características específicas del horno del Centro de Investigaciones del Níquel con todo su equipamiento, parámetros de operación entre otros.

Mora. (1999) realiza un balance térmico y de masa de los hornos de reducción considerando los gases de hornos y el aire frío como aire secundario o de disolución.

Chang Cardona y Yuzhaninov; (1997) en el libro de texto Cálculo de los principales procesos en los hornos metalúrgicos se estudia la aplicación de la teoría de los procesos: tecnológicos, aerodinámico, mecánico, transmisión de

calor y energético en los cálculos y proyecto de los hornos metalúrgicos, incluyendo sus instalaciones auxiliares.

También Bachir (2001) realiza un balance térmico y de masa para determinar el consumo de combustible tomando el aire frío y los gases de hornos como aire secundario.

Chang. C. Ar. Hornos metalúrgicos: Este libro incluye los aspectos generales de la teoría integral de los hornos de la metalurgia no ferrosa, el papel e interrelación de los principales procesos que ocurren en ellos como son: el tecnológico, energético, aerodinámico, mecánico y de transferencia de calor. Materiales de proyección, construcción y explotación de los mismos.

Referido al segundo elemento el descubrimiento más significativo en este sentido es la importancia del mezclado del sólido para la transferencia total de calor a la capa, obtenido por Folliot (1955), quien realizó mediciones del flujo de calor en un horno experimental de cemento y fue de los primeros en enfatizar este hecho. Se estableció que el flujo de calor hacia la capa puede ser visto como un proceso en dos etapas que incluyen la transferencia de calor desde una fina capa hacia el interior del mismo.

Incropera *et al.* (2003) abordaron la temática relacionada con la teoría general de la transferencia de calor y masa, en esta publicación existe una amplia conceptualización de las leyes y principios físicos relacionados con la transmisión del calor y constituye un pilar fundamental para la comprensión de las mismas en sus más diversas formas.

1.6. Conclusiones del Capítulo I

- ❖ La revisión bibliográfica demostró que existe un soporte teórico satisfactorio que permite el establecimiento de un procedimiento de cálculo útil para determinar las pérdidas de energía en el proceso de reducción.
- ❖ El análisis del proceso tecnológico desarrollado permite integrar conocimientos suficientes para el estudio de las fases de la planta experimental de hornos de reducción.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Introducción

El conocimiento del proceso, el desarrollo de expresiones matemáticas que representen los fenómenos físicos de los sistemas y el proyecto para la implementación de las nuevas tecnologías es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual del sector industrial.

En este capítulo se plantea como **objetivo**:

Establecer el procedimiento de cálculo satisfactorio para la evaluación de las pérdidas de energía en los hornos con el proceso de reducción del mineral laterítico en el objeto de estudio.

Para la realización del balance de materia se deben conocer los índices de entrada y salida del proceso. Para el caso de un horno de reducción se tienen:

Índices de entrada:

- Materia Prima a procesar: Mineral seco proveniente de la Planta de Secadero que presenta una humedad: 3 %.
- Petróleo Aditivo: Se suministra el 2 % de petróleo por cantidad de mineral que ingresa al Horno.
- Aire en el hogar cuatro, kg/h.
- Petróleo Tecnológico, kg/h.

Índices de salida:

- Mineral reducido, kg/h.
- Pérdida de polvo con los gases, kg/h.
- Gases de salida por la chimenea kg/h.

Para la realización de los cálculos se tomaron los siguientes datos:

Al horno entran 1 040 kg/h de mineral seco; 20,8 kg/h de petróleo aditivo; 52 kg/h de petróleo (Mazut).

Composición química del mineral de entrada:

$Ni = 1,40 \%$; $Co = 0,122 \%$; $Fe = 41,4 \%$; $Cu = 0,01 \%$; $Zn = 0,04 \%$;

$Mn = 0,67 \% ; Mgo = 3,93 \% ; SiO_2 = 7,68 \% ; Al_2Cr_3 = 7,03 \% ;$

$Cr_2O_3 = 2,24 \% ; C = 1,61 \% ; S = 0,35 \%$

Composición química del petróleo:

$C = 84,4 \% ; H_2 = 12 \% ; H_2O = 0,27 \% ; S = 2,37 \% ; O_2 = 0,01 \%$

2.2. Cálculo de la combustión del petróleo tecnológico:

Para este cálculo se toman las reacciones de combustión completa, teniendo la masa de un elemento se puede calcular la masa del otro reaccionante y la de los productos. Con la masa del oxígeno diatómico (O_2) calculada se procede al cálculo de la combustión incompleta que es lo que realmente ocurre en el horno con un 62 % de aeración.

Las masas de los elementos se calculan a través de la ecuación 2.1.

$$\text{Masa} = \frac{\text{Masa(elemento)} \times n \cdot \text{MM}(x)}{n \cdot \text{MM}(\text{elemento})} \quad (2.1)$$

Donde:

Masa(x): Masa elemento que se desea conocer (kg).

Masa(elemento): Masa elemento conocido (kg).

n: Cantidad de sustancia (kmol).

MM: Masa molecular (kg/kmol).

Las masas moleculares empleadas se muestran en el Anexo # 2.

Todas las masas calculadas en el trabajo se realizan por la ecuación 2.1.

El carbono debe reaccionar con un 100 % de oxígeno combustionándose completamente.

La ecuación 2.2, representa la reacción del carbono líquido con el dióxigeno gaseoso transformándose en dióxido de carbono.



El cálculo de la masa del oxígeno diatómico teórico, se realiza por la siguiente ecuación.

$$M(O_{2teorico}) = \frac{M(C) \times nMM(O_2)}{nMM(C)}$$

Donde:

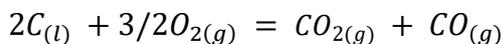
$M(O_{2teorico})$: Masa del oxígeno diatómico teórico (kg).

$M(C)$: Masa del carbono (kg).

n: Cantidad de sustancia (kmol).

MM: Masa molecular (kg/kmol).

Para la combustión incompleta con 62 % del aire teórico.

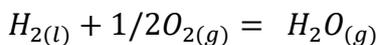


$$M(C) = \frac{M(O) \cdot nMM(C)}{nMM(O_2)}$$

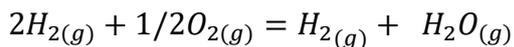
$M(C)$ que no reacciona:

$$M(C) = M^t(C) - M(C)_{(reacc)}$$

Para el H_2 la combustión completa sería:



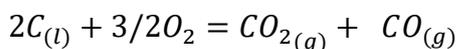
Para el 62 % del oxígeno alimentado:



Para formar el H_2O quedan:

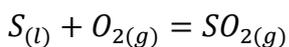
$$M^t(H_2) - M(H_2) = 2,34 \text{ kg}$$

Este O_2 reacciona con el C que queda sin reaccionar.



$$M(C)_{\text{que forma hollín}} = 7,6 - 6,1 = 1,5 \text{ kg}$$

Para el S_2 :



Para el 62 %:

$$M^t(O_2) = MO_{2(C)} + MO_{2(H_2)} + MO_{2(S)} + MO_{2(\text{combust.})}$$

La ecuación 2.3 se utiliza para determinar el volumen de los gases:

$$V = \frac{M(Kg) \cdot 22,4(m^3/kmol)}{MM(kg/Kmol)} \quad (2.3)$$

Donde:

M : masa de cada gas (kg)

MM = masa molecular (kg/kmol)

22,4 = volumen molar ($m^3/kmol$)

La ecuación 2.4 se utiliza para determinar la masa del aire que entra al horno:

$$M(\text{aire}) = V(\text{aire}) \cdot \rho(\text{aire}) \quad (2.4)$$

Done:

$V(\text{aire})$ = volumen del aire calculado (m^3)

$$V(\text{aire}) = \frac{M(O_2)(kg) \cdot 22,4(m^3/kmol)}{MM(O_2)(kg/kmol)}$$

$M(N_2) = M(\text{aire}) - M(O_2)$

En la tabla 2.1 se muestran los diferentes valores de masa y volumen que poseen los gases del petróleo tecnológico.

Tabla 2.1. Valores de masa y volumen de los gases del petróleo tecnológico.

Gases	CO_2	CO	H_2O	H_2	SO_2	N_2	Total
M(kg)	77,7	49,9	21,06	3,9	1,4	345,8	500
V(m^3)	39,5	39,5	26,2	43,68	1,53	172,1	321,66
V(%)	12,28	12,28	8,14	13,57	0,17	53,51	100

En los análisis realizados por el laboratorio los valores promedios de CO y CO_2 son 13 y 9 % respectivamente por lo que los cálculos se ajustan a estos valores.

La ecuación 2.5 se utiliza para el cálculo del volumen real de los gases.

$$VR = \frac{\%prefij \cdot Vt}{100\%} \quad (2.5)$$

Donde:

VR : Volumen real (m^3)

$\%prefij$: Volumen prefijado (%)

V_t : Volumen total.

Conociendo el volumen de cada elemento se calcula la masa de estos.

La ecuación 2.6 se utiliza para determinar la masa del elemento:

$$M_{(elemento)} = \frac{V_{(elemento)} \cdot MM_{(elemento)}}{24,4} \quad (2.6)$$

Donde:

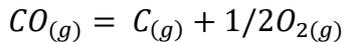
$V_{(elemento)}$: volumen del elemento calculado (m^3)

$MM_{(elemento)}$: masa molecular (kg/kmol)

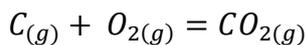
22,4: volumen molar ($m^3/Kmol$)

$$M(CO) : \frac{V(CO) \cdot MM(CO)}{22,4}$$

$M(CO) = 52,3 \text{ kg}$. Con esta masa del óxido de carbono calculada se vuelven a calcular las masas para el carbono y el oxígeno.



A partir de la masa de O_2 y de la masa de $O_2^{0,62}$ se determina la masa de O_2 presente en el CO_2 :



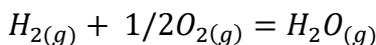
Determinación de la masa del carbono que queda sin reaccionar

$$M(C)_{queda} = M^t(C) - M^{CO}(C) - M^{CO_2}(C)$$

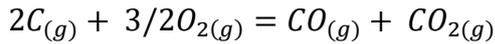
Para hidrógeno se realizó el mismo análisis utilizando como volumen prefijado 10 %:

A partir de esta masa y la masa total de H_2 se determina la masa de H_2 presente en el H_2O

$$M(H_2) \text{ presente en el agua} = 3,38 \text{ kg}$$



Con esta masa de O_2 y la masa de $O_2^{0,62}$ se determina la masa de O_2 que reacciona con la $M(C)$ que quedaba:



En la tabla 2.2 se muestran los valores de masa y volumen que poseen los gases del petróleo tecnológico.

Tabla # 2.2 Gases del petróleo tecnológico.

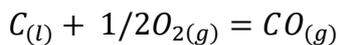
Gases	CO ₂	CO	H ₂ O	H ₂	SO ₂	N ₂	Total
M(kg)	62,38	54,58	30,42	3,9	1,4	345,8	500
V(m ³)	31,75	43,66	37,85	43,68	0,54	172,13	329,61
V(%)	9,63	13,2	11,0	13,3	0,16	52,3	100

2.3. Cálculo de los gases del petróleo aditivo

Al horno se suministra petróleo aditivo previamente mezclado con el mineral, el petróleo utilizado tiene igual composición química que el petróleo tecnológico.

Se asume el comportamiento del petróleo aditivo, se considera la oxidación primaria del carbono (C).

El carbono líquido reacciona con el dióxígeno gaseoso para formar monóxido de carbono gaseoso.



La masa se calcula por la fórmula (2.1).

Las masas moleculares se toman del anexo # 2.

De los cálculos realizados anteriormente se determinan los gases totales que se tienen para realizar la reducción del mineral.

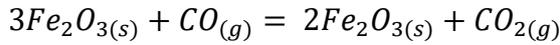
$$M_t^{CO} = M_{(P.A)}^{CO} + M_{(P.T)}^{CO}$$

$$M_t^{H_2} = M_{(P.A)}^{H_2} + M_{(P.T)}^{H_2}$$

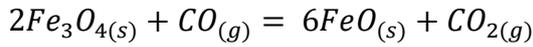
2.4. Cálculos de la reducción

La composición de la materia prima se muestra en el Anexo # 1.

Las masas se calculan por la fórmula (2.1) tomando las masas moleculares de anexo # 2.



$$M(Fe_3O_4) = \frac{M(Fe_2O_3) \cdot nMM(Fe_3O_4)}{nMM(Fe_2O_3)}$$



La ecuación 2.7 se utiliza para el cálculo de la reducción:

$$\Gamma = \frac{M_{(transferida)} \cdot 100\%}{M_{(inicial)}} \quad (2.7)$$

$$M_{(transferida)} = \frac{M_{(inicial)} \cdot \Gamma}{100\%}$$

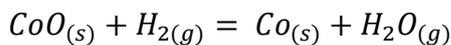
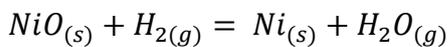
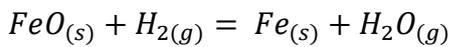
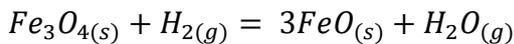
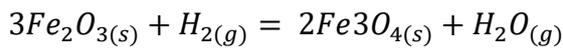
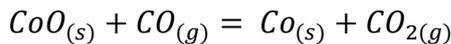
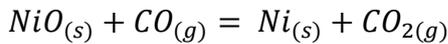
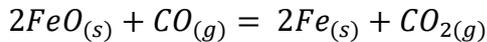
Donde:

Γ = grado de transformación (%)

$M_{(inicial)}$ = masa del elemento de entrada (kg)

$M_{(transferida)}$ = masa que se reduce (kg)

$M(Fe_3O_4)$ masa que se transforma, es la tercera parte aproximadamente.



Gases que se necesitan para reducción

$$M(CO) = M^T CO_{(Ni)} + MCO_{(Fe)} + MCO_{(FeO)} + MCO_{(Fe_3O_4)} + MCO_{(Co)}$$

$$M(H_2) = M^T H_{2(Ni)} + MH_{2(Fe)} + MH_{2(FeO)} + MH_{2(Fe_3O_4)} + MH_{2(Co)}$$

Masa total de gases tecnológicos

$$M(CO_2) = M^T CO_{2(Ni)} + MCO_{2(Fe)} + MCO_{2(FeO)} + MCO_{2(Fe_3O_4)} + MCO_{2(Co)}$$

$$M(H_2O) = M^T H_2O_{(Ni)} + MH_2O_{(Fe)} + MH_2O_{(FeO)} + MH_2O_{(Fe_3O_4)} + MH_2O_{(Co)}$$

Masa de los gases que llegan al hogar 4

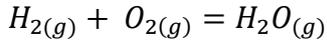
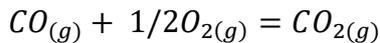
$$M(CO) = M^T CO - MCO_{reacc.}$$

$$M(H_2) = M^T H_2 - MH_2_{reacc.}$$

2.5. Combustión en el hogar cuatro

Como la combustión en el horno es incompleta y no todos los gases reductores producto de ésta son utilizados en la zona de reducción, en el Hogar cuatro se inyecta aire que reacciona con el óxido de carbono y el dihidrógeno que no reaccionan hasta este momento, permitiendo el aprovechamiento de calor de la reacción exotérmica que ocurre en el oxígeno diatómico y los gases reductores para el precalentamiento del mineral en los hogares superiores. Se calcula como combustión completa.

Las masas se calculan por la ecuación (2.1) y las masas moleculares se escogen en el anexo # 2.



El O_2 representa el 23 % másico de aire.

La ecuación 2.8 se utiliza para el cálculo de la masa de aire presente en el hogar cuatro.

$$M_{(aire)} = \frac{M(O_2) \cdot 100}{23} \quad (2.8)$$

Despejando el volumen de aire teórico en la fórmula (2.4) se determina:

$$V_{(aire teor)} = \frac{M_{(aire)}}{\rho_{(aire)}}$$

El coeficiente de exceso de aire es 1,15.

$$V_{(aire práctico)} = V_{(aire teórico)} \cdot 1,15$$

El O_2 representa el 21 % másico de aire

$$M(O_{2libre}) = \frac{V(O_{2libre}) \cdot nMM(O_2)}{22,4}$$

$$M_{(aire práctico)} = V_{(aire práctico)} \cdot \rho_{(aire)}$$

2.6. Cálculo general de los gases de salida del horno:

$$M^T(H_2O) = M(H_2O)_{tecnol.} + M(H_2O)_{P.T} + M(H_2O)_{H-4} + M(H_2O)_{exter.}$$

$$M^T(CO_2) = M(CO_2)_{tecnol.} + M(CO_2)_{P.T} + M(CO_2)_{H-4}$$

$$M^T(N_2) = M(N_2)_{P.T} + M(N_2)_{H-4}$$

En la siguiente tabla se muestran los valores de masa y volumen que poseen los gases a la salida del horno de reducción.

Tabla # 2.3. Gases de salida del horno.

Gases	H_2O	CO_2	N_2	O_2	Total
M (kg)	113,15	189,62	502,1	6,16	810,4
V (m^3)	140,0	96,8	401,68	4,31	643,8
V (%)	21,8	15,1	62,48	0,7	100

2.7. Balance energético del horno de reducción

El balance térmico de los hornos es el desglose por diferentes índices de entrada y salida de calor. Por la ley de conservación de la energía.

$$\Sigma Q_{entrada} = \Sigma Q_{salida}$$

Para realizar el balance energético se necesitan conocer los índices que entran y salen del horno:

Índices de entrada

Calor de los gases de la cámara, calor físico del mineral de entrada, calor físico del petróleo aditivo, calor de la combustión incompleta, calor físico del aire inyectado en el hogar cuatro, calor de los procesos exotérmicos.

Índices de salida

Calor de los gases de salida por la chimenea, calor del mineral reducido, calor de evaporación del agua, calor de los procesos endotérmicos, calor del aire de enfriamiento del eje central, pérdidas al medio ambiente.

Para estos cálculos se emplearon los datos de las masas y volúmenes obtenidos en el balance material, las capacidades caloríficas medidas se muestran en los anexos 4 y 5 y las temperaturas de trabajo se muestran en la tabla 2.3.

Tabla # 2.3. Temperaturas de trabajo.

Los gases que salen de la cámara (°C)	1400
Los gases de la salida de la chimenea (°C)	330
Mineral de entrada (°C)	45
Mineral de salida (°C)	715
Petróleo adictivo (°C)	95
Petróleo tecnológico (°C)	110
Aire del eje central (°C)	110
Aire de la post-combustión (°C)	45

2.8. Cálculo de los índices de entrada y salida de los gases del horno

Cálculo de los índices de entrada:

La ecuación 2.9 se utiliza para determinar el calor de varios elementos analizados en el proceso.

$$Q = V \cdot cmp \cdot t \quad (2.9)$$

$$Q = M \cdot cmp \cdot t$$

Donde:

Q : calor (kcal)

V : volumen (m³)

M : masa (kg)

cmp : capacidad calorífica medida (kcal/kg°C)

t : temperatura de trabajo (°C)

Calor físico del mineral de entrada:

$$Q = M \cdot cmp \cdot t$$

Calor físico del petróleo aditivo:

$$Q = M \cdot cmp \cdot t$$

Calor del aire que se inyecta en el hogar cuatro:

$$Q = V \cdot cmp \cdot t$$

Calor de la combustión incompleta:

Se extrae de los anexos.

Calor sensible de los gases que salen de la cámara:

Se extrae de los anexos.

Calor de los procesos exotérmicos:

$$Q = \Sigma Q \text{ reacciones exotérmicas}$$

$$Q = \frac{M_{(\text{elemento})} \cdot \Delta H_{(\text{reacciones})}}{nMM_{(\text{elemento})}}$$

Donde:

$$\Delta H_{(\text{reacciones})} = n\Sigma\Delta H_p - n\Sigma\Delta H_r \text{ (Kcal/mol)}$$

$M_{(\text{elemento})}$: masa (kg)

MM: masa molecular (kg/mol)

A continuación, se muestra un ejemplo sobre el procedimiento de cálculo empleado:

Para la reacción exotérmica siguiente:



Los valores de ΔH_f se toman del anexo # 3.

Este análisis se realizó para cada una de las reacciones que ocurren en proceso.

$$Q = \Sigma Q \text{ reacciones exotérmicas}$$

La entrada total de calor sería:

$$Q = \Sigma Q \text{ entrada}$$

Cálculo de los índices de salida

Los cálculos se realizan empleando la fórmula (2.9), los antecedentes aparecen en las tablas 3.1 y 3.2 resumen del balance material y los datos de capacidad calorífica media en los anexos 4 y 5.

Calor del mineral reducido:

$$Q = M \cdot cpm \cdot t$$

Calor de los gases que salen del horno:

$$Q = V \cdot cpm \cdot t$$

Calor del aire de enfriamiento del eje central:

$$Q = V \cdot cpm \cdot t$$

Calor de calentamiento, evaporación y sobrecalentamiento del agua:

Se evaporan 85,5 kg de agua, lo que representa 145 m^3 de volumen.

$$Q = M_{(\text{H}_2\text{O})} \cdot cpm \cdot \Delta t_1 + M_{(\text{H}_2\text{O})} \cdot \lambda + V_{(\text{H}_2\text{O})} \cdot cpm \cdot \Delta t_2$$

Donde:

$Q_c: M_{(H_2O)} \cdot cpm \cdot \Delta t_1 =$ Calor que se necesita para el calentamiento.

$Q_e: M_{(H_2O)} \cdot \lambda =$ Calor que se necesita para la evaporación.

$\lambda:$ Calor latente de cambio de estado.

$Q_{sc}: V_{(H_2O)} \cdot cpm \cdot \Delta t_2 =$ Calor que se necesita para el sobrecalentamiento.

$M_{(H_2O)}$: masa del agua que se evapora.

$V_{(H_2O)}$: volumen del agua que se evapora.

cpm : Capacidad calorífica media.

Calor de las reacciones endotérmicas

Para este cálculo se emplea el mismo método que para las reacciones exotérmicas, utilizando en este caso las reacciones que absorben calor.

$Q = \Sigma Q$ reacciones endotérmicas.

$$Q = \frac{M_{(\text{elemento})} \cdot \Delta H_{(\text{reacciones})}}{nMM_{(\text{elemento})}}$$

Donde:

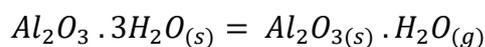
$$\Delta H_{(\text{reacciones})} = n\Sigma\Delta H_p - n\Sigma\Delta H_r \text{ (kcal/mol)}$$

$M_{(\text{elemento})}$: masa (kg)

MM : masa molecular (kg/mol)

A continuación, se muestra un ejemplo sobre el procedimiento de cálculo empleado:

Para la reacción endotérmica siguiente:



Los valores del ΔH_f se toman del anexo 3.

Este análisis se realizó para cada una de las reacciones que ocurren en el proceso.

$Q = \Sigma Q$ reacciones endotérmicas

Pérdidas de calor al medio ambiente: se asumió un 5 % de pérdida del calor de entrada.

La salida total de calor sería:

$$Q = \Sigma Q_{salida}$$

2.9. Conclusiones del Capítulo II

- ❖ Quedó establecido el procedimiento de cálculo para la evaluación del objeto de estudio, el mismo tiene en cuenta los índices de entrada y salida al horno de reducción para la realización del balance material con el fin de determinar las pérdidas de energía.
- ❖ Los criterios considerados para el establecimiento del procedimiento de cálculo le confieren al mismo una exactitud superior a la lograda en los procedimientos establecidos con anterioridad y permiten la evaluación satisfactoria del comportamiento térmico del horno.

CAPITULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS, VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1. Introducción

Con los datos tenemos la posibilidad de conocer donde ocurren las mayores pérdidas de energía obtenidos en el balance material, se pudo realizar el balance energético y de esta forma estudiar diferentes variantes para la disminución de éstas. Con el fin de disminuirlas se presentan dos posibles variantes de mejoras del proceso tecnológico.

En las tablas 3.1 y 3.2 se muestran el resumen de los resultados del balance material.

Tabla 3.1. Resumen del balance material.

Entrada							
	Mineral alimentado (kg/h)	Gases de la cámara (kg/h)	Gases P.A (kg/h)	Aire en H- 4 (kg/h)	Total		
<i>Ni</i>	14,56				14,56		
<i>Co</i>	1,27				1,27		
<i>Fe</i>	430,56				430,56		
<i>MgO</i>	40,87				40,87		
<i>Mn</i>	6,96				6,96		
<i>SiO₂</i>	79,9				79,9		
<i>H₂O</i>	110,03	30,42			140,45		
<i>O₂</i>					46,7	46,7	
<i>N₂</i>					345,8	156,3	502,1
<i>CO</i>					54,58	27	81,58
<i>CO₂</i>					62,38		62,38
<i>H₂</i>					3,9	2,4	6,3
Total			684,15	497	29,4	203	1413,55

Tabla 3.2. Resumen del balance material.

Salida				
	Mineral salida (kg/h)	Pérdida de polvo con los gases (kg/h)	Gases de salida por chimenea (kg/h)	Total
<i>Ni</i>	13,51	0,4976		14,007
<i>Co</i>	1,20	0,0391		1,2391
<i>Fe</i>	416,35	16,336		432,68
<i>MgO</i>	40	0,1922		40,192
<i>Mn</i>	6,9	0,0535		6,9535
<i>SiO₂</i>	79,9			79,9
<i>H₂O</i>			113,15	113,15
<i>O₂</i>			6,16	6,16
<i>N₂</i>			502,1	502,1
<i>CO</i>				
<i>CO₂</i>			189,62	
<i>H₂</i>				
Total	557,85	17,119	810,4	1385,369

En la tabla 3.3 se muestran los resultados de grados de transformaciones ocurridos en la reducción.

Tabla 3.3. Grados de transformación.

Elemento	Grado de reducción (%)
<i>Ni</i>	85
<i>Co</i>	50
<i>Fe a Fe⁰</i>	3
<i>Fe a FeO</i>	35
<i>Fe a Fe₃O₄</i>	50

Variante # 1.

Esta variante analiza la posibilidad de utilizar el calor de los gases que salen del horno como agente combustible en la cámara de combustión de secadero desviando los gases de secadero del Ventury e introducirlos en la cámara de combustión con el fin de obtener un ahorro de petróleo en estos y una mayor recuperación de polvo del sistema.

Variante # 2

Estudia la posibilidad de utilizar el aire caliente producto del enfriamiento que sale del eje central e introducirlos en los hogares cuatro y seis del horno, sustituyendo el aire frío que se utiliza para lograr la post-combustión.

3.2. Estudio de la variante # 1

La propuesta se puede apreciar directamente en la modificación que se refleja en el diagrama de flujo, en este caso se presentan partes de las zonas o áreas de trabajo involucradas en la modificación, referentes a horno de reducción y secadero respectivamente.

En la figura 3.1 se muestra la propuesta de la variante 1.

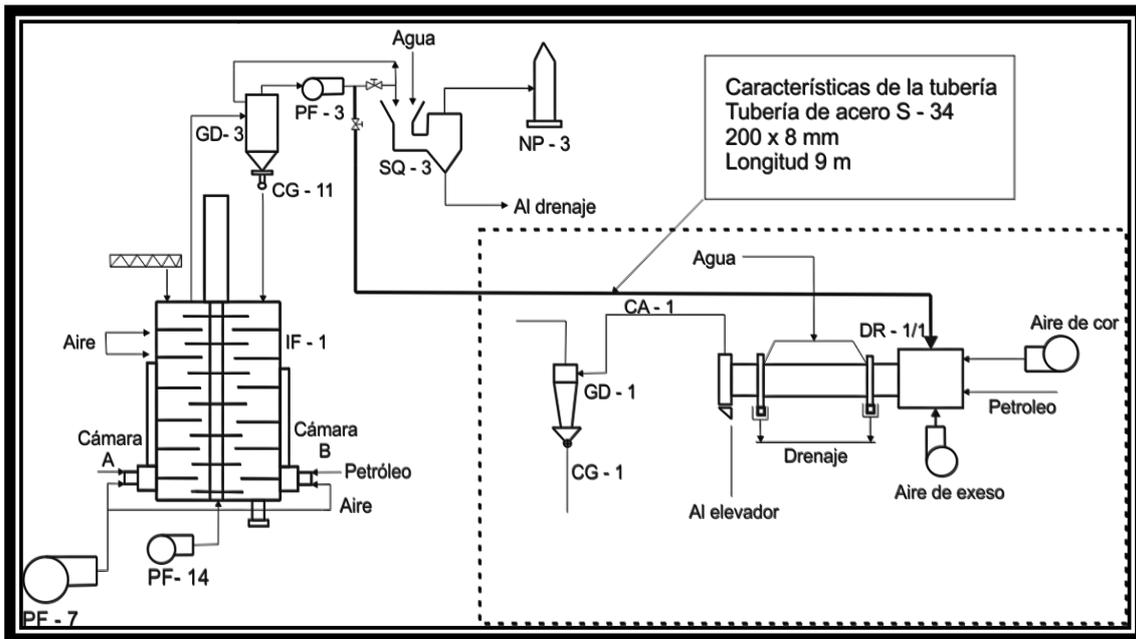


Figura 3.1

Para el estudio se tomaron como base los datos de un balance energético realizado por especialistas del CEDININQ (Centro de Investigaciones del Níquel) sobre el secadero, estos datos se muestran en la tabla 3.4.

En la tabla 3.4 se muestra el resumen de los resultados obtenidos en el balance energético de secadero.

Tabla 3.4. Resumen del balance energético del secadero.

Calores	Valor (kW/h)	(%)
Calentamiento y evaporación	434894	68,1
Calor sensible de los gases de salida	71161	11,2
Calor sensible del mineral secado	20351	3,2
Pérdidas por convección y radiación	111706	17,5
Total	638112	100

Los datos del horno de reducción se tomaron de la tabla resumen sobre el balance energético.

Calor sensible de los gases que salen del horno: 72 659,96 kW/h.

Valor calórico del petróleo: 10 000 kW/kg.

La metodología de cálculo utilizada se muestra a continuación:

$$Q_A = Q_T - Q_H$$

Donde:

Q_A = Calor a producir en secadero a partir del uso de los gases. (kW)

Q_T = Calor de los gases de secadero (kW)

Q_H = Calor de los gases del horno (kW)

$$Q_A = 565\,452 \text{ kW/h}$$

Para calcular la cantidad de petróleo que se utiliza en kg/h:

$$Q_T = 638\,112 \text{ kW/h}$$

$$\text{Para } Q_A = 565\,452 \text{ kW/h}$$

Cálculo de ahorro de petróleo por unidad de tiempo:

Ahorro = Consumo antes del uso de los gases – Consumo después del uso de los gases.

$$\text{Ahorro} = 63,81 - 56,54 = 7,27 \text{ kg/h}$$

Para un día: 7,27 kg/h. 24 h = 174,48 kg/día.

Para un año: 62,812 t

Tomando como base el precio del petróleo en 131 CUC la tonelada.

Por hora = 7,27 kg/h = 0,00727. 131 CUC = 0,95

Por año = 8228,47 CUC

Cálculo del flujo másico de los gases de salida de secadero a 90 °C.

En la siguiente tabla se muestran los resultados de los gases de la salida de secadero.

Tabla 3.5 Resultados de los gases a la salida de secadero.

Gases		Masa (kg)		Consumo (kg-mol petróleo/h)		(kg-mol gas/h)		Masa molar (kg/kmol)		Gases (kg)
CO_2	=	0,825	X	5,5612	=	4,5879	X	44	=	201,8
SO_2	=	0,0301	X	5,5612	=	0,1723	X	64	=	11,027
N_2	=	13,598	X	5,5612	=	75,62	X	28	=	2117,36
O_2	=	2,7110	X	5,5612	=	15,076	X	32	=	482,43
H_2O	=	0,584	x	5,5612	=	47,54	X	18	=	855,72

Flujo de gases = 142,99 kg - mol/h. $24,4 \text{ m}^3 / \text{kg-mol} \cdot (273 + 90) \text{ K} / (273+0) \text{ K}$

Flujo de gases = 4258,90 m^3/h = 70,98 m^3/min .

Con el volumen de gases producto de la combustión en la cámara de secadero más los gases que llegan de los hornos se puede hallar el volumen total de los gases que tendrá que extraer el ventilador de extracción.

$V_t = \text{Flujo de gases de secadero} + \text{Flujo de gases de horno}$

$V_t = 4258,90 + 1400 = 5658 \text{ m}^3/\text{h}$

El ventilador de aire primario entrega un caudal de 559 m^3/h .

El ventilador de aire secundario entrega un caudal de 3100 m^3/h .

El ventilador de extracción de gases del secadero entrega un caudal de 6 100 m^3/h como máximo.

3.3. Estudio de la variante # 2

El proceso de calentamiento del horno se sitúa en los primeros hogares (0 y 4), para lograr este efecto es necesario un volumen de aire en exceso adicional que pueda producir el encendido de la combustión internamente en el hogar 4. El aire necesario se obtiene directamente por una ramificación de la línea

principal de salida de aire atmosférico del ventilador PF-7, el mismo se inyecta a temperatura ambiente a los cinturones de ambos hogares por medio de los satélites correspondientes y producto del alto nivel de agentes productores que va ascendiendo dentro del horno, se produce el encendido y con ello la combustión completa que se necesita en este lugar. Ver el diagrama de flujo que se muestra en la figura 3.2.

En la figura 3.2 se muestra la propuesta de la variante 2.

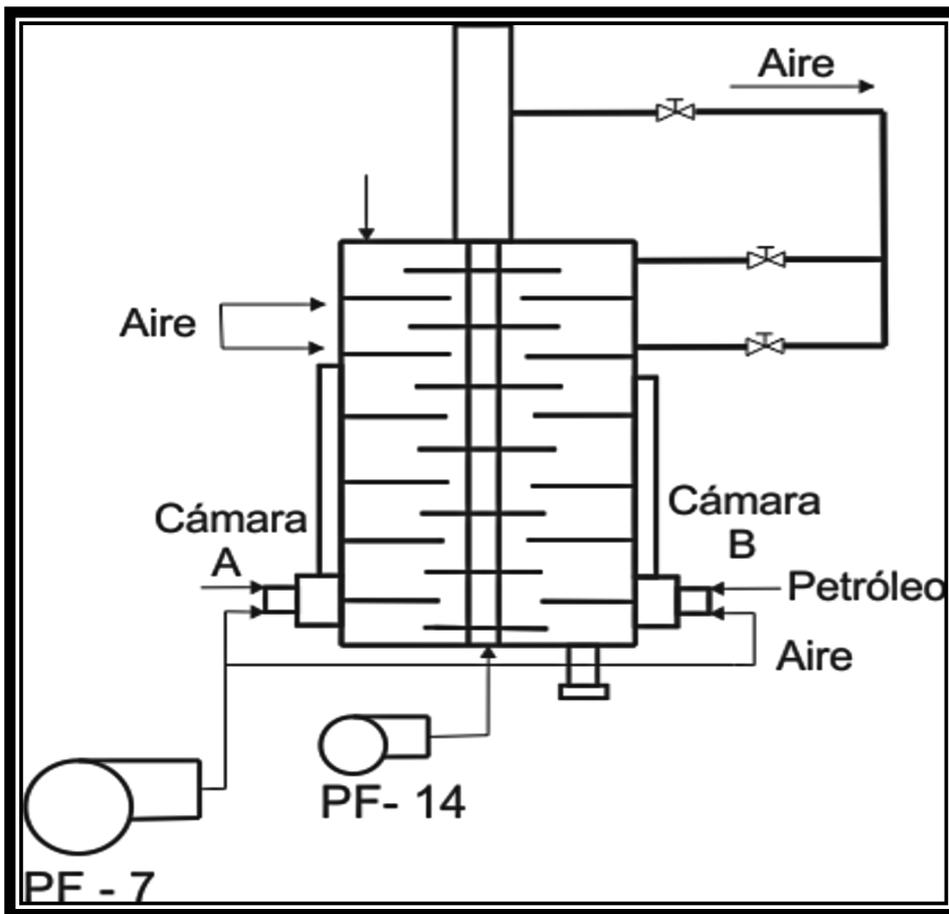


Figura 3.2

Este sistema cuenta con un ventilador de tiro inducido (PF-7) para trasegar el aire de enfriamiento del eje central con las siguientes características.

Caudal = 1 200 m³/h .

H = 800 mm en la columna de agua (mm c.a)

n = 3 480 rpm

$$\eta = 0,7$$

$$N_{\text{ventilador}} = 4,47 \text{ kW}$$

$$N_{\text{motor}} = 5,5 \text{ kW}$$

Como este ventilador entrega más aire del necesario se recomienda poner una válvula de regulación automática con el fin garantizar el control de la temperatura del aire y poniendo ésta en la salida del ducto del eje, en lugar de regular la entrada como se hace en la actualidad daría la altura de elevación para el suministro de este aire en los hogares.

Para este trabajo se aprovecha el ciento por ciento de la instalación existente del sistema de alimentación a través del ventilador de combustión, que en este caso se deja de usar y solo hay 5 m de tuberías de 0,0508 m e implementar un lazo de regulación automática para el control antes mencionado. Esta instalación nos permite aprovechar la energía sensible de este aire, además de usarlo como aire de post-combustión en los hogares cuatro y seis.

Las descripciones de los materiales y recursos usados se exponen en el análisis de dicha variante.

3.4. Análisis económico

El análisis económico de este trabajo se realiza partiendo del costo de inversión de las variantes propuestas y su amortización según la incidencia de éstas en el proceso tecnológico.

3.4.1. Valoración económica de la variante # 1

Para transportar los gases que salen del horno producto de la combustión hasta la cámara de secadero se debe realizar una inversión utilizando para ello una tubería de 0,2 m de diámetro y 0,008 m de espesor para que los gases viajen a una velocidad dentro de la norma, con un largo de 35 m, actualmente existe en la planta piloto una tubería que se encuentra montada y fuera de uso que posee este diámetro y tiene una longitud de 26 m de los 35 m que se necesitan.

El precio de este tipo de material oscila entre 300 y 400 CUC el metro.

En la tabla 3.6 se muestra los gastos de inversión de la instalación según los materiales necesarios.

Tabla 3.6. Gastos de inversión de la instalación.

Material	Unidad	Cantidad	Precio/unidad (CUC)	Precio total (CUC)
Tubería de acero 34, 200x8 mm	m	9	250	2250
Codo de acero 34, 200x8 mm	u	5	180	900
Válvula de mariposa, 200 mm, cierre metal-metal	u	2	200	400
Te, 200x8 mm, acero 34	u	1	250	250
Electrodo de 4 mm	kg	20	20	400
Insulación	m ²	13	80	1098
Total				5298

En la tabla 3.7 se muestra los gastos de inversión para el pago de la fuerza laboral.

Tabla 3.7. Fuerza laboral.

Tipo	Tarifa (\$/día)	Tiempo (día)	Cantidad	Costo (\$)
Ingeniero	15,8	7	1	110,6
Supervisor	15,8	7	1	110,6
Soldador A	13,3	7	1	99,1
Mecánico A	13,3	7	2	186,2
Mecánico B	12,3	7	2	172,2
Tubero A	13,3	7	1	110,6
Total				789,7

Con esta variante para un año se ahorran: 62, 812 t de petróleo.

Tomando como base el precio del petróleo en 131 CUC/t.

Por año se ahorra = 8228,47 CUC

La inversión se recupera en 9 meses de trabajo por lo que es factible su aplicación, además que se recuperaría el total del mineral en forma de polvo que sale con los gases de la salida.

3.4.2. Valoración económica de la variante # 2

Al introducirse en los hogares cuatro y seis el aire caliente proveniente del eje central, no solo se produce un ahorro por concepto de calentamiento del aire, sino que esta mejora el funcionamiento del hogar y por ende el de horno.

En la tabla 3.8 se muestra los gastos de inversión de la instalación según los materiales necesarios.

Tabla 3.8. Gastos de inversión de la instalación.

Material	Unidad	Cantidad	Precio/unidad (CUC)	Precio total (CUC)
Tubería de acero 34, 50x3 mm	m	5	60	300
Codo de acero 34, 50x3 mm	u	3	50	150
Válvula de estrangulación, 2 pul	u	2	100	200
Válvula de mariposa, 250 mm	u	1	800	800
Manómetro manométrico 0-250 (mVAR)	u	1	250	250
Insulación	m ²	2	80	160
Total				1760,00

En la tabla 3.9 se muestra los gastos de inversión para el pago de la fuerza laboral.

Tabla 3.9. Fuerza laboral.

Tipo	Tarifa (\$/día)	Tiempo (día)	Cantidad	Costo (\$)
Ingeniero	15,8	7	1	110,6
Supervisor	15,8	7	1	110,6
Soldador A	13,3	7	1	99,1
Mecánico A	13,3	7	2	186,2
Mecánico B	12,3	7	2	172,2
Tubero A	13,3	7	1	110,6
Instrumentista A	13,3	7	1	99,1
Total				888,40

El costo total de la instalación en la etapa inversora es de: **\$ 2648,40**

Efecto sobre el ahorro de combustible

Método para calcular el aporte de calor del aire de enfriamiento del eje central.

El aire en el hogar 4 aporta 2 199,9 Kcal, si entra a 110 °C:

$$Q = 5387,8 \text{ Kcal}$$

$$Q_{\text{aportado}} = Q_{\text{aire a } 45^{\circ}\text{C}} - Q_{\text{aire a } 110^{\circ}\text{C}}$$

$$Q_{\text{aportado}} = 3187,9 \text{ Kcal para llevarlo a kg:}$$

$$Q_{\text{aportado}} = 3187,9 \text{ Kcal} / 10000 \text{ Kcal/Kg} = 3,1879 \text{ Kg.}$$

Para un día:

$$3,1879 \text{ Kg. } 24 \text{ h} = 76,5096 \text{ Kg/h} = 0,076 \text{ t.}$$

Tomando la tonelada de petróleo a 131 CUC:

Para un día = 10,0227 CUC

Para un año se ahorrarían 3638,26 CUC

Si se compara este resultado con el costo total de la inversión, se verá que la amortización de la instalación para esta variante se logra en 8 meses.

Como se ha podido ver en ambos casos el efecto económico arroja resultados positivos, los cuales alientan la materialización de las propuestas presentadas.

3.5 Impacto ambiental

Un problema ambiental es la percepción de una situación o estado no satisfactorio con respecto a una parte o a la totalidad del medio ambiente. Es el empeoramiento cualitativo del entorno causado por la actividad antropica como la industrialización, la urbanización, la explotación irracional de los recursos, la presión demográfica o por factores naturales.

Los problemas ambientales pueden ser de carácter global, regional, nacional y local atendiendo a la extensión de su impacto. Un problema ambiental global es aquel de alcance planetario por sus causas o manifestaciones y que sólo pueden ser resueltos o paliados por la acción mancomunada de las naciones. Los de carácter regional son aquellos que afectan a varios países, a veces continentes enteros o una parte significativa de ellos o masas de agua que bañan a varios países. Los problemas nacionales como su nombre lo indica son los que producen afectaciones en un territorio considerable de un país, y los locales acusan un impacto en los marcos de una localidad.

Dentro de los principales problemas detectados en la empresa durante las operaciones habituales que en ella se realiza se encuentran los siguientes:

1. Contaminación del aire por emisiones de gases y polvo en la planta de proceso.
2. Incremento de los volúmenes de sedimentos en suspensión de las corrientes superficiales.

3. Alteración de hábito de las especies naturales.

3.5.1. Influencia del polvo en el medio ambiente

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues es en este medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial, ruido o gases por citar algunos.

La contaminación del aire es una amenaza aguda para el obrero en la empresa, es acumulativa y crónica para la salud humana constituyendo otro aspecto del bienestar humano y el ambiente.

En el caso de la empresa, originada específicamente por fuentes fijas y móviles de tecnologías obsoletas heredadas de años y que, por problemas económicos, muchas de ellas aún siguen funcionando, independientemente de notarse mejorías en los niveles de emisiones contaminantes a lo largo del municipio.

Los niveles actuales de los contaminantes atmosféricos y su relación con la ocurrencia de enfermedades respiratorias resultan de gran interés por su vinculación directa con la salud humana y con el nivel de vida de la población, estos se clasifican en agudos, acumulativos y crónicos, dependiendo del tipo y grado de exposición y de los factores personales que modifican la acción de los diferentes contaminantes.

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad; además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales. Además, por el estado tecnológico de la planta, hay emisión de polvo hacia el lugar de trabajo, lo cual hace menos favorable las condiciones de trabajo en algunas áreas de la planta.

Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vías:

1. Inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias.

2. Absorción de polvos a través de la piel.

Las partículas pueden tener efecto tóxico de las maneras siguientes:

1. Pueden ser intrínsecamente tóxicas por las características químicas inherentes.
2. Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
3. Puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

3.5.2 Influencia del ruido en el medio ambiente

Las emisiones continuas de ruido es uno de los impactos directos afectando al hombre en su medio laboral. El origen del mismo es el funcionamiento continuo de equipos de grandes dimensiones, que como resultado de su operación emiten determinados niveles de ruido que alcanzan valores muy intensos en algunas zonas de la instalación.

La presencia del ruido es uno de los elementos que más afectan las condiciones de trabajo en el ambiente laboral incidiendo directamente sobre la salud física y mental de los trabajadores y tributa a la aparición de las enfermedades profesionales asociadas a este fenómeno fundamentalmente cuando se encuentra con los medios de protección individuales.

La afectación directa de este impacto produce lesiones en el oído interno destruyendo las células ciliadas del órgano de corti, dando lugar a la hipoacusia neurosensorial pura de percepción, con la disminución de los niveles de audición tanto por vía ósea como aérea, la cual además es una lesión irreversible y progresiva dependiendo especialmente de la intensidad y el tiempo de exposición.

Estas afectaciones producen efectos indirecto y negativos como el incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardíaco, la contracción de los capilares de la piel, el incremento del metabolismo, la lentitud de la digestión,

las afectaciones al sueño, y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental fundamentalmente.

3.6. Conclusiones del capítulo III

- ❖ Mediante el balance material se demostró que las pérdidas de energía son provocadas producto a la mala combustión en los hogares.
- ❖ Se comprobó que para las condiciones actuales existe un vertimiento excesivo de energía sin su aprovechamiento máximo el cual se puede mejorar implementando las variantes 1 y 2 propuestas que mejorarían el proceso y la economía, ahorrando anual 8228,47 CUC y 3638,26 CUC respectivamente al país.

CONCLUSIONES GENERALES

- ❖ El trabajo cumplió con los objetivos propuestos ya que con la realización de los cálculos del balance material y energético del horno de reducción se conocieron las pérdidas de energía que ocurren en el proceso.
- ❖ Se tomaron como base los datos de las pérdidas para proceder a un estudio que permitan la disminución o la utilización de estas en la planta.
- ❖ Analizando los índices de salida del horno se llegó a la conclusión de que las mayores pérdidas ocurren en el mineral reducido.
- ❖ Se puede utilizar la energía de los gases de salida de la chimenea en la cámara de secadero como combustible, así como el aire de enfriamiento que sale del eje central utilizándolo como sustituto del aire frío de la post-combustión.
- ❖ La valoración económica demuestra que la variante propuesta # 1 ahorraría para un año 8228,47 CUC y la inversión se recupera en 9 meses de trabajo en la planta y la # 2 ahorraría para un año 3638,26 CUC la inversión se recupera en 8 meses.

RECOMENDACIONES

- ❖ Utilizar los gases de salida de la chimenea en la cámara de secadero logrando una disminución de la cantidad de petróleo a utilizar para el secado del mineral.
- ❖ Utilizar el aire producto del enfriamiento del eje central en sustitución del aire frío que se inyecta para la post-combustión para mejorar el proceso.
- ❖ Estudiar la posibilidad de precalentar el aire para la post combustión que se suministra al quemador ya que esto puede traer un ahorro por sustitución de petróleo que actualmente se utiliza para calentar este aire.

REFERENCIAS

1. Chang. C. Ar. Hornos metalúrgicos ISMM Moa Holguín.
2. Colectivos de autores. Controles automáticos para procesos. Parte I. Editorial pueblo y educación.
3. Colectivos de autores. Técnicas de consumo energético en la industria. Ahorro en proceso Parte I y II.
4. Colectivos de autores. Termodinámica Química. Balance material. Editorial pueblo y educación.
5. Estrada. P. V t, al. Fundamentos de hornos y combustibles. Editorial pueblo y educación.
6. F. Karpov Sq. Centrales termoeléctricas. Editorial pueblo y educación.
7. Faieres, Virgil. Termodinámica. Edición revolucionaria.
8. Paulov. K. F. et. al. Problemas y ejemplo para el curso de operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. Edit MIR, Moscú. 1981.
9. Perez Barreto, Rafael. Introducción a la electromecánica minero-metalúrgica. ISMM Moa Holguín.
10. Pérez Garay, Luis. Generación de vapor. Editorial pueblo y educación.
11. Samsonov G.V. et. al. Propiedades físico químicas de los óxidos. Moscú. Edit. Metalurgia. 2da edición 1970.
12. Vaniukov. A. V. et. al. Teoría de los procesos pirometalúrgicos. Moscú. Edit. Metalurgia 1981.
13. Arrebola, Abelardo. Informe técnico. Aprovechamiento del calor sensible del aire de los ejes centrales de los hornos de reducción.
14. Aldana, Eugenio. Informe Técnico. Calculo del balance energético del secadero del CEDININQ.
15. Ávila W. Ramón y Medrano, Ignacio. Tesis de grado. Algoritmo de operaciones del horno de reducción por balance de materia y energía.
16. Colectivo de autores. Informe técnico, Aprovechamiento de los gases de desecho de los hornos como combustible en la cámara de combustión de secadero.
17. Colectivo de autores. Informe de investigaciones. Procesamiento de los minerales en las instalaciones del CEDININQ.
18. Manual de operaciones de la Planta de Hornos de reducción de la empresa Ernesto Che Guevara.

19. Manual de operaciones de la planta piloto de Punta Gorda CEDININQ.

ANEXOS

Anexo # 1. Características de la materia prima empleada en el proceso.

Materia prima	Elemento							
	<i>Ni</i>	<i>Co</i>	<i>Fe</i>	<i>MgO</i>	<i>Mn</i>	<i>SiO₂</i>	<i>H₂O</i>	
Mineral alimentado (1040 Kg/h)	14,56	1,27	430,56	40,87	6,96	79,9	110,03	
Materia prima	Elemento							
	<i>C</i>		<i>H</i>		<i>H₂O</i>		<i>S</i>	
Petróleo tecnológico (52 Kg/h)	43,9		6,24		0,1144		1,1323	
Petróleo adictivo (20,8 Kg/h)	16,8		2,4		0,0457		0,4492	

Anexo # 2. Masas moleculares utilizadas para los cálculos.

Elemento	<i>NiO</i>	<i>Ni</i>	<i>O₂</i>	<i>CoO</i>	<i>Co</i>	<i>Fe</i>	<i>Fe₃O₄</i>	<i>Fe₃O₃</i>	<i>FeO</i>
Masa molecular (g/mol)	74,7	58,7	16	74,933	58,933	55,847	231,5	159,69	71,84
Elemento	<i>C</i>	<i>O</i>	<i>CO</i>	<i>CO₂</i>	<i>H₂</i>	<i>H₂O</i>	<i>SO₂</i>	<i>N₂</i>	<i>S</i>
Masa molecular (g/mol)	12	16	28	44	2	18	64	14	32

Anexo # 3. Calores de formación de los compuestos.

Compuesto	Fórmula	Calor de formación (H_f^0)
Óxido de aluminio	Al_2O_3	-399,09
Monóxido de carbono	CO	-26,4157
Dióxido de carbono	CO_2	-94,0518
Óxido de cobalto	CoO	-57,2
Óxido de hierro	FeO	-64,3
Óxido de hierro	Fe_3O_4	-267,0
Óxido de hierro	Fe_2O_3	-196,5
Óxido de níquel	NiO	-58,4
Dióxido de silicio	SiO_2	-205,4
Dióxido de azufre	SO_2	-70,96
Agua	H_2O	-59,3
Gibbsita	$Al_2O_3 \cdot 3H_2O$	-613,9

Anexo # 4. Capacidades caloríficas empleadas en los cálculos.

Material	Capacidad calorífica (Kcal/Kg .°C)
Mineral de entrada	0,187
Petróleo	0,465
Aire	0,31
Gases que salen de la cámara	0,705
Mineral de salida	0,27
Gases de la chimenea	0,342

Anexo # 5. Capacidades caloríficas a diferentes temperaturas del horno.

Hogar	Temperatura del mineral (°C)	<i>cmp</i> del mineral (Kcal/Kg°C)
0	95	0,2119
1	140	0,2119
3	340	0,2439
5	550	0,2591
7	600	0,2587
9	640	0,2601
11	665	0,2601
13	685	0,2601
15	713	0,2705