



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

*Comportamiento del carbono en el petróleo aditivo
en los hornos de reducción de la empresa
“Comandante René Ramos Latourt”.*

Tesis presentada en opción del título de Ingeniero Metalúrgico

Rigoberto Rodríguez Pupo

Moa, 2013



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa

“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

Facultad de Metalurgia y Electromecánica

*Título: Comportamiento del carbono en el petróleo
aditivo en los hornos de reducción de la empresa
“Comandante René Ramos Latourt”.*

Tesis presentada en opción del título de Ingeniero Metalúrgico

Diplomante: Rigoberto Rodríguez Pupo

Firma: _____

Tutores: Dr. Eulícer Fernández Maresma

Firma: _____

Ing. Luis Antonio Paumier Samé

Firma: _____

Moa, 2013



Dedicatoria

*A quienes les debo lo que hoy soy: A mi madre, **Elvia Pupo Zucarino**, por su **preocupación**, y **sacrificio** incondicional y el **amor** y la constancia que han puesto en mi educación; por guiarme y apoyarme en todo momento, por confiar en que podía lograrlo, por ser ejemplo de honradez.*

A todas aquellas personas cercanas a mí que influyeron en mi desarrollo profesional, por ayudarme durante toda mi carrera y a los que siempre guardo en mi corazón.

A toda mi familia en general.



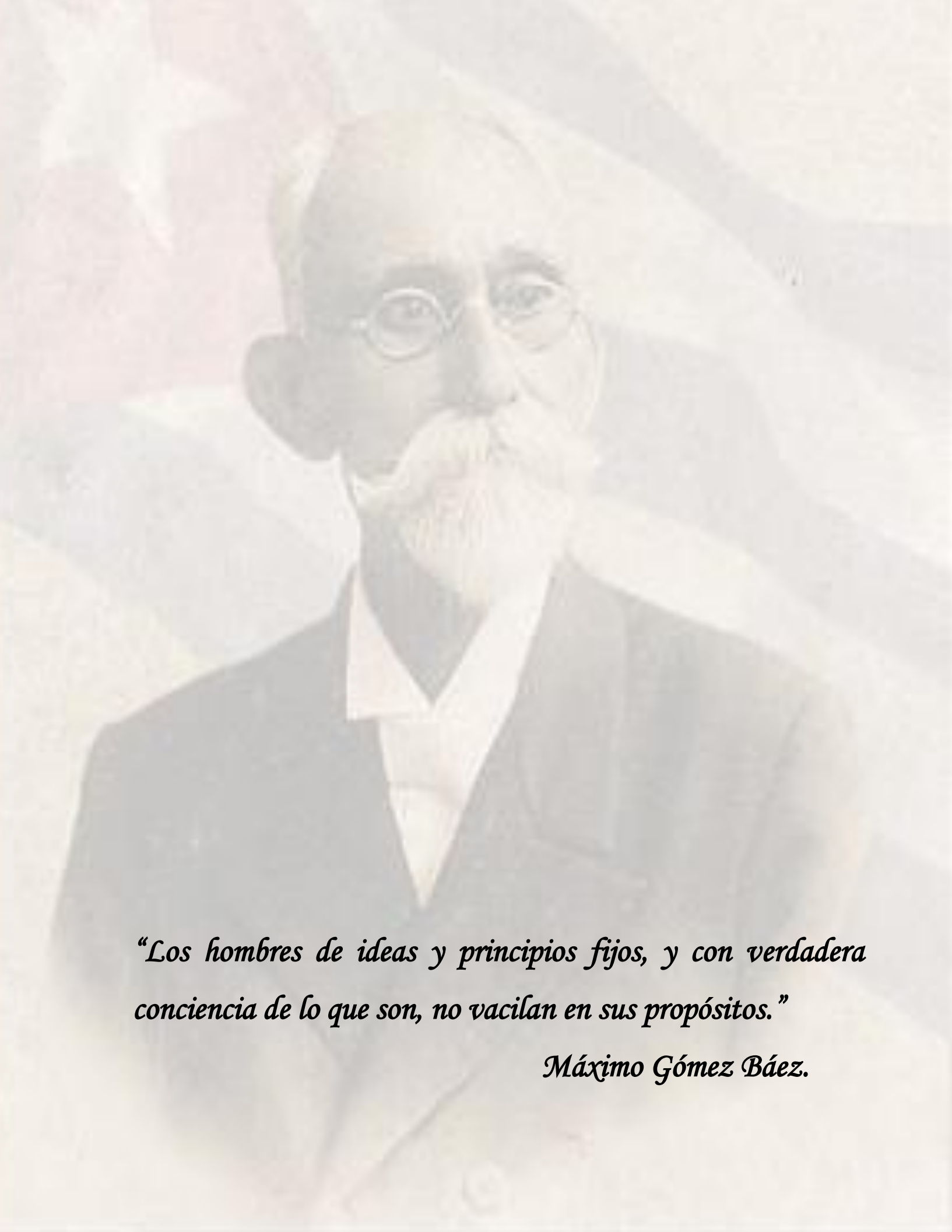
Agradecimiento

*De forma muy especial quiero expresar mis más sinceros **agradecimientos***

- *A mi **madre** por su apoyo y confianza en toda mi etapa de estudiante.*
- *A mi **esposa** por toda su ayuda, **preocupación** y apoyo que me brindó durante todo este tiempo.*
- *A mi hermano por darme siempre su ayuda incondicional.*
- *A mis **hijas** que de alguna forma u otra también inciden en mi formación como profesional.*
- *A mis amigos, que de una forma u otra siempre han estado conmigo.*
- *A las personas que se convirtieron en mi familia aquí en Moa e incondicionalmente me ayudaron.*
- *Y muy en especial a mi tutor **Eulícer Fernández Maresma** y todo el clausto de profesores del instituto por su gran interés, paciencia y dedicación, a quien le debo en gran medida la realización de este trabajo.*

A todos Muchas Gracias.

*Por favor, son tantos a los que agradecer, que aunque no los mencione en estas líneas, tengan presente que les estoy agradecido **Eternamente**".*



“Los hombres de ideas y principios fijos, y con verdadera conciencia de lo que son, no vacilan en sus propósitos.”

Máximo Gómez Báez.



Resumen

Este trabajo esta encaminado a obtener una valoración analítica del comportamiento del carbono que participa en el proceso de reducción de Nicaro a partir de los parámetros de entrada y salida a la planta con lo que se pretende proveer a los tecnólogos de la empresa de datos que puedan servir como base de estudios mas profundos, que conlleven a una elevación de la eficiencia del proceso de reducción con ahorro de combustible (fuel oil) de alto costo en el mercado.

Se hace una valoración económica a partir de la nueva tecnología empleada para el suministro de petróleo aditivo a los hornos mediante lanzas automáticas.

Se pretende confirmar los resultados obtenidos en cuanto a extractable y consumo de combustible con la utilización de petróleo aditivo para la reducción directamente en el horno analizando el comportamiento del carbono en el proceso de reducción y así proponer posibles vías para el empleo óptimo de uno de nuestros principales portadores energéticos. Se evaluó la operación del horno 21 durante los días que se efectuó el muestreo, tomando información del mismo evaluando su eficiencia actual con la utilización del mineral con petróleo aditivo.

Fueron tomadas y analizadas muestras del mineral crudo y del mineral reducido y mediante las pruebas de calidad del mineral reducido se realizó el cálculo del extractable de níquel y cobalto a la salida del enfriador, además se realizaron análisis de gases en el hogar¹⁰, los resultados de ellos están expresados en la tablas 5.



ABSTRACT

This work is guided to obtain an analytic valuation of the behavior of the carbon that participates in the process of reduction of Nicaro starting from the receipt and discusement parameters to the plant with what is sought to provide the technologists of the company of data that can serve like base of studies but deep that with they take to an elevation of the efficiency of the reduction process with the traditional saving of fuel (fuel oil) of high cost in the market.

An economic valuation is made starting from the new technology used for the supply of petroleum preservative to the ovens by means of automatic lances.

It is sought directly to confirm the obtained results as for extractable and consumption of fuel with the use of petroleum preservative for the reduction in the oven analyzing the behavior of the carbon in the reduction process and this way to propose possible roads for the good employment of one of our main energy payees. The operation of the horno 21 was evaluated during the days that the sampling was made, taking information of the same one evaluating its current efficiency with the use of the mineral with petroleum preservative.

They were taken and analyzed samples of the raw mineral and of the reduced mineral and by means of the Tests QT you calculates the nickel extractable and cobalt to the exit of the cooler, they were also carried out analysis of gases in the Hogar10 the results of them are expressed in the charts 5.



ÍNDICE

Pág

Introducción	9
1 Estado del Arte y Estudio Teórico	11
1.1 Algunos antecedentes de trabajos realizados con la utilización de petróleo aditivo en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”	11
1.1.1 Dosificación de petróleo, eficiencia operativa de las lanzas	14
1.1.2 Factores que influyen en la reducción.....	18
1.1.2.1 Influencia de la temperatura.....	18
1.1.2.2 Influencia de la granulometría	19
1.1.2.3 Composición de la materia prima	19
1.1.2.4 Concentración de gases	19
1.1.2.5 Número de hogares	20
1.1.2.6 Estabilidad en la alimentación	20
1.1.2.7 Tiempo de retención	20
2 Materiales y métodos	22
1.1.3 Parámetros a controlar.....	22
1.1.4 Valoración de los errores posibles.....	23
1.1.5 Características del petróleo utilizado	23
1.1.6 Muestreo y análisis del mineral.....	25
2.2 Características técnicas del horno 21	28
3 Análisis de los Resultados	31
1.1.7 Operación del Horno	33
1.1.8 Perfiles de mineral reducido en el horno	37
Conclusiones	47
Recomendaciones	48
Bibliografía.....	49



INTRODUCCIÓN

Uno de los llamados que hace la revolución en estos momentos consiste en la necesidad de consolidar la economía manteniendo una tenaz lucha para lograr el desarrollo de la industria en general, tratando de obtener valores mayores de eficiencia y productividad con el menor de los costos, para lo cual es de vital importancia el correcto aprovechamiento de todos los recursos que se emplean en el proceso.

Un ejemplo de ello lo constituye la Empresa René Ramos Latour que se encuentra situada al noroeste de la provincia de Holguín. En ella son tratados los minerales oxidados de níquel a partir de un proceso carbonato amoniacal ideado por el Ingeniero W. H. Carón, obteniendo como producto final óxidos y sinter de níquel y cobalto.

La empresa surge en el año 1943 por iniciativa del gobierno norteamericano fecha en que el mundo era escenario de la II Guerra Mundial debido a la importancia del níquel para la Industria Bélica y el desarrollo científico-técnico.

En el año 1960 cuando la empresa es nacionalizada con la llegada de la revolución y pasa a manos de sus verdaderos dueños, la clase obrera, la cual logra con su conciencia de trabajo dar soluciones a todos los problemas que como consecuencia de la reacción imperialista se presentaron constituyendo un baluarte inexpugnable de la clase obrera cubana donde cada trabajador se esfuerza por elevar la productividad del trabajo y se lucha diariamente por la obtención de mayores y mejores resultados lo que ha dado lugar a la formación de nuevos trabajadores destacados y que la ha mantenido laborando por 66 años consecutivos.

El níquel es de suma importancia para la economía pues constituye en estos momentos el principal renglón económico y una de las fuentes más importantes para el ingreso de divisa al país.

Teniendo en consideración los precios en el mercado mundial en la actualidad y la imperiosa necesidad de obtener el producto final con la calidad requerida disminuyendo el consumo de la materia prima empleada, como ha llamado nuestro presidente del Consejo de Estado y de Ministros el General de Ejército Raúl Castro Ruz, valorando la actual crisis mundial que enfrenta el país y los precios actuales del petróleo y fundamentalmente el desarrollo y consolidación de la industria cubana del níquel, se hace necesario realizar los estudios sobre el comportamiento del



carbono en el petróleo aditivo en los hornos de reducción, de la Empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro, con la utilización del petróleo aditivo.

Por lo que la **situación problemática** es: Insuficiente conocimiento del comportamiento del carbono en el petróleo aditivo en los Hornos de Reducción de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”, con la utilización de petróleo aditivo, que permita determinar posibles vías de ahorro de uno de los principales portadores energéticos y obtener mejores extracciones de níquel y cobalto, permitiendo a su vez que el trabajo sirva como punto de partida para nuevos estudios sobre esta problemática.

Objetivo general: Determinar el comportamiento del carbono en el petróleo aditivo en los hornos de reducción de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”, con la utilización de petróleo aditivo.

Hipótesis: Si se estudia cómo se comporta el carbono en el petróleo aditivo en los hornos de reducción de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”, con la utilización de petróleo aditivo, se podrán obtener mejores extracciones de níquel y cobalto, además de posibles vías de ahorro de uno de los principales portadores energéticos.

Campo de acción: Taller de hornos de reducción de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”, así como otras empresas que utilicen hornos de hogares múltiples en el proceso de reducción del mineral con la utilización de petróleo aditivo como agente reductor.

Tareas de trabajo:

- 1- Determinar en el proceso de reducción el comportamiento del carbono en el petróleo aditivo en los hornos de hogares múltiples de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”,
- 2- Influencia del mineral de reciclo.
- 3- Evaluar las afectaciones al medio ambiente que ha provocado el cambio de la tecnología y proponer posibles vías de solución.



1 ESTADO DEL ARTE Y ESTUDIO TEÓRICO

Durante 66 años de explotación de la empresa “Comandante René Ramos Latour” se han ejecutado investigaciones para mejorar los valores de eficiencia principalmente en la etapa de reducción (Tavío González G.1995) que constituye el eslabón fundamental para el proceso carbonato amoniacal, esta etapa es la primera acción de índole química que sufre la materia prima y de ella depende en gran medida la eficiencia técnico-económica del proceso integral.

Una reducción eficiente garantiza que la mayor parte de los metales (níquel y cobalto, fundamentalmente) pasen a solución en el licor lixivante y de esta forma ser extraídos.

Desde el año 1995 producto del mal estado técnico de la planta de gas pobre existente en aquellos momentos, se cambió la tecnología y se comenzó a utilizar el petróleo aditivo como agente reductor en los hornos de reducción (TAVÍO, G.1999) y aunque ya se habían realizado investigaciones sobre la utilización del petróleo aditivo como agente reductor del mineral (TAVÍO, G.1996) ninguno de estos trabajos plantea el contenido real del carbono que actúa en la reducción.

Se pretende que el trabajo permita conocer el contenido de carbono que se origina en el proceso de reducción con la utilización de petróleo aditivo y además lograr mejores valores de eficiencia con menor consumo del fuel-oil que se utiliza en el proceso de reducción.

1.1 Algunos antecedentes de trabajos realizados con la utilización de petróleo aditivo en la planta de Hornos de Reducción de la Empresa “Comandante René Ramos Latour”

La experiencia del uso de petróleo aditivo durante casi dos décadas en Nicaro, muestra que su problema fundamental reside en que se desconoce el contenido de carbono en el aditivo con su utilización lo que requiere una atención mayor que los otros métodos por la multiplicidad de los puntos de adición.

Se conoce además que el uso de petróleo aditivo en el proceso de reducción mejora las características del mineral reducido y aumenta la eficiencia del proceso. De la misma manera los aditivos pueden servir como fuente suplementaria de energía para la obtención de la temperatura necesaria y las reacciones endotérmicas de reducción.



En julio de 1968 se realizó una prueba tentativa introduciendo petróleo por el Hogar 9 del horno 21 además del gas reductor normalmente empleado. La lanza utilizada era un tubo de acero aleado al Ni y Cr que tenía en su extremo una boquilla de quemador de petróleo de los secaderos, esta lanza se introdujo al horno por uno de los orificios para situar termopares.

El experimento se realizó del 9 al 18 de julio y sentó las bases para futuras investigaciones de adición de petróleo con lanzas. Durante las pruebas oficiales se introdujo petróleo por el Hogar 9 con lanzas de 2 boquillas y se llegó a las conclusiones preliminares siguientes:

La adición de petróleo en el rango de 1 % del peso del mineral seco mejora la reducción de los compuestos oxidados de níquel.

- El porcentaje de azufre y carbono en la descarga del horno experimenta un ligero aumento.
- Formación de gas reductor dentro de la masa de mineral
- Mejora el contacto gas – sólido.
- Aumenta la concentración de agentes reductores.
- Disminuye en pequeñas cantidades la velocidad de lixiviación del níquel
- Aumenta el grado de reducción del hierro y el contenido de C cambia de 0,6 a 2 % contenido en el mineral reducido
- Aumenta la temperatura en los licores de lixiviación en 1era etapa.
- No afecta la velocidad de sedimentación de la pulpa.

La extracción de níquel en el licor se muestra al mismo nivel en ambas Plantas (80,8 y 80,6%, respectivamente) la extracción de cobalto disminuye.

Del 9 al 30 de octubre de 1970, se realizó en la Planta de Hornos, en los hornos 17 y 18, una prueba de reducción del mineral utilizando petróleo exclusivamente. El petróleo se añadió en el rango de 1,1 a 1,7 %. En el hogar 11 se añadió aproximadamente el 35 % del petróleo total y el resto en el Hogar 7. Los resultados se compararon con los hornos 19 y 20 que operaron normalmente.



Tabla 1 Muestra los resultados del níquel reducido, velocidad de sedimentación, contenido de monóxido de carbono y temperatura en la descarga del enfriador con la utilización de gas de petróleo y de carbón

	Reducción con gas petróleo	Reducción con gas de carbón
Extracción (%)	80,30	81,20
velocidad de Sedimentación (m/h)	1,24	1,01
CO en Chimenea (%)	1,63	2,10
Temperatura enfriadores(⁰C)	178	170

Como se muestra en la **tabla 1** los resultados obtenidos con la utilización del gas de carbón y la del petróleo permite el empleo del aditivo, aunque los parámetros son menores es más factibles para la economía del país basado en el precio del carbón en el mercado internacional.

La prueba preliminar justificó la continuidad de estos trabajos, con mejores condiciones.

Los años más representativos de la utilización de petróleo aditivo fueron 1974 y 1975 donde se logró reducir el consumo de gas a 70 m³ por tonelada de mineral, con un consumo de petróleo en cámaras de 56,3 kg/t; se consumieron 6,1 kg/t de mineral como aditivo. Con esto se logró un extractable de 80,93 % para una ley de Ni de 1,264 % y una ley de Fe de 39,02 %.

Una cuestión importante en la adición de petróleo es realizar una buena mezcla del mineral con el petróleo antes de la reducción para garantizar alta efectividad y rendimiento del proceso por lo tanto, cuando la homogenización del petróleo y el mineral no es la correcta, se requieren altos consumos de reductor y el mineral reducido contiene elevado porcentaje de carbón. La calidad del mineral reducido puede afectar los parámetros tecnológicos del proceso posterior. Una parte del petróleo aditivo se volatiliza y descompone durante el atomizado, requiriéndose altos consumos de reductor para alcanzar recuperaciones similares de níquel a las que se alcanzan cuando se mezcla previamente.

A partir de 1976 el uso de petróleo aditivo fue abandonándose debido al interés del país de ahorrar este portador energético suministrado por la URSS, reservándose el uso del petróleo para bajar carga y resolver las alteraciones de planta de gas. Por estas razones el petróleo aditivo se utilizó en los años de 1968 a 1986 conjuntamente con el gas reductor como reactivo.



A partir del año 1998 se reinician las investigaciones con la utilización de petróleo aditivo en la planta de Secaderos en la correa caliente.

El Centro de Investigaciones del Níquel (CEINNIQ) comienza las investigaciones en el año 1998, en el horno 13 y 21 realiza las primeras pruebas de petróleo aditivo con utilización de lanzas automatizadas en la planta nueva de los hornos.

Demostrando en la práctica que se obtienen resultados de extractables altos y estables y con supresión total del gas reductor, además de las pruebas industriales realizadas en 1991 en el horno 1 con la lanza ubicada en el hogar 7 y en los años 1998-2000 en los hornos 13 y 21, también ubicadas en el hogar 7.

1.1.1 Dosificación de petróleo, eficiencia operativa de las lanzas

G. Tavío abril 2004, realiza una investigación donde hace una valoración de la dosificación y eficiencia operativa de las lanzas montadas en el hogar 7, demostrando que la dosificación de petróleo por la lanza se realizó eficientemente a partir del 18 de marzo del 2004 al sustituir las boquillas por las que no poseen balín y están soldadas y no roscadas al tubo de menor diámetro de la lanza.

A partir del 18 de marzo del 2004 se eliminaron los cheques en la línea de petróleo de la lanza para lograr una menor caída de presión y mejorar la característica de operación de la válvula automática, la limpieza de la línea del flujo que se realizaba con vapor automáticamente cada 15 minutos se decide ponerla manual ya que una parte del mineral que se alimentaba al horno 21 no se le inyectaba el aditivo.

El valor del porcentaje de petróleo se fijó en 2,5 % y solo se disminuyó en pocas ocasiones cuando la temperatura de los gases que salen hacia el electrofiltro se incrementaba por encima de 280 °C.

Héctor Alepuz, (1993), realizó un resumen de las variantes estudiadas para la adición de petróleo, en el que refirió: se introdujo petróleo en el Hogar 9 usando un atomizador o dado, basándose en el criterio de introducir el reductor en la zona en que ocurre un desprendimiento de agua de composición, que es oxidante. Por problemas del régimen de temperatura, se trasladó al Hogar 7. Se tomó como objetivo añadir el petróleo como forma de elevar el extractable con buenos resultados, pero provocando la sobre reducción del mineral, alterando así su comportamiento en



la lixiviación, se evaluó, en periodos alternativos de procesamiento con y sin petróleo aditivo, la operación con lanzas, alcanzándose mejores resultados en todos los índices de reducción y sedimentación.

En el año 2004 se aprobó por el personal técnico en conjunto con los del CEINNIQ el montaje de las lanzas automáticas en el hogar 7, en ese mismo año se pasaron para el hogar 1 y por último para el sinfín alimentador.

Algunos antecedentes de la planta de Hornos de Reducción de la Empresa “Comandante René Ramos Latour” y particularidades del proceso de reducción.

Estos hornos originalmente fueron construidos por la firma HERRESHOFF inicialmente eran 21 hornos luego se incorporó otro llegando hasta 22 en total pero entre 1995 y 1997 se sustituyeron todas las cámaras por cámaras PRIOR y se disminuyeron los hornos a 11. Cada horno esta constituidos por 17 hogares que van desde el 0 hasta 16.

Son hornos de hogares múltiples con un eje central con 4 brazos en cada hogar los que disponen de dientes o raspadores para remover y transportar el mineral de un hogar a otro, el contacto gas- sólido de las partículas aumenta en su caída libre.

El mineral desciende en los hogares pares por la periferia y en los impares por el centro con el objetivo de incrementar el tiempo de residencia evitando los cortocircuitos y con ello incrementar dicho contacto.

Las cámaras de combustión se encuentran en los hogares 6, 8, 10, 12 y 15, una en el lado norte y otra en el lado sur. En los hornos 1, 3, 5, 9, 15, 19 y 21 se trasladó una de las cámaras del

Hogar 15 para el Hogar 14 con el fin de mejorar el perfil térmico en el horno, esta modificación tecnológica se hará en los hornos 7, 11, 13 y 17 según se le realice su reparación capital.

Por el hogar 4 se introduce aire con el objetivo de reaccionar con el monóxido de carbono evitando que lleguen al electrofiltros, este es un gas que al pasar de 2,8 % que es su rango máximo de operación puede provocar explosión.

El horno opera con una presión positiva ligera para evitar que entre aire atmosférico lo que provocaría la reoxidación del mineral.



Por el transportador sinfín alimentador de cada horno y mediante lanzas automatizadas se dosifica el petróleo aditivo con una relación establecida con el tonelaje alimentado por las romanas para aportar los gases reductores necesarios para las reacciones de reducción que deben tener lugar en el horno.

El mineral reducido que descarga por el hogar 16 va a un transportador de aletas conocido por JACOBY y de aquí descarga a un tambor rotatorio (enfriador de mineral) introducido parcialmente en una piscina de agua con flujo continuo, el objetivo es disminuir la temperatura del mineral hasta valores menores de 280 °C en Planta Vieja y 180 °C en Planta Nueva (tienen mayor área de transferencia de calor) de forma tal que entre un mineral con menor temperatura para su posterior proceso.

El mineral seco y molido enviado por la planta de Secaderos y Molinos tiene las siguientes características:

Ni (%)	1,10 a 1,20
Fe (%)	38 a 46
SiO ₂ (%)	< 15
MgO (%)	< 10
Malla +100 mesh (%)	< 7
Malla +200 mesh (%)	> 83
Humedad (%)	4 a 5

El mineral reducido tiene la siguiente composición:

Ni (%) 1.09 – 1.14

Fe (%) 40 – 43

Estos valores dependen de la ley de níquel y hierro de entrada.

Cada una de las 8 cámaras del horno esta equipada con un quemador PRIOR SSB-7 (pequeño) ó SSB –10 (grande), que combustionan el petróleo de forma incompleta para lograr la temperatura



y los gases reductores necesarios para la reducción. El petróleo es bombeado y calentado en una estación dispuesta para este fin.

El proceso de reducción esta encaminado a lograr una selectividad tal que permita máximas extracciones de níquel y mínima de hierro teniendo en cuenta que la fracción magnética es la que más favorece la lixiviación amoniacal.

Este proceso es heterogéneo y ocurre fundamentalmente entre la línea divisoria entre las fases sólida y gaseosa, y la velocidad de reacción va a estar determinada principalmente por la difusión del gas al interior de las partículas, por la concentración de reductores y la velocidad con que son desalojado los productos de la reacción. El mineral que se procesa, denominado limonítico y serpentínico tiene su diferencia en cuanto a su composición química, por tal motivo el tratamiento que se le da durante la operación de reducción también tiene sus diferencias.

El mineral limonítico caracterizado por su mayor contenido de hierro esta formado por una serie de óxidos de hierro como son: Hematita: Fe_2O_3 , Goethita: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{H}_2\text{O}$, Magnetita: FeOFe_2O_3 , Limonita: $\text{Fe}_2\text{O}_3\cdot\text{H}_2\text{O}$, Cromita: $\text{FeO}\cdot\text{Cr}_2\text{O}_3$.

En estos minerales se encuentra presente el níquel y su reducción es bastante sencilla, una excelente reducción se puede lograr a menores temperaturas. Además en estos minerales se alcanza una granulometría, lo cual ayuda positivamente al proceso a proporcionar una mayor superficie activa del mineral.

El mineral serpentínico esta formado principalmente por silicatos hidratados, como son:

1. Gentita: $2\text{NiO}_2\text{MgO}_3\text{SiO}_2\cdot 6\text{H}_2\text{O}$
2. Garnierita: $(\text{NiMg})\text{OSiO}_2\cdot\text{H}_2\text{O}$
3. Nepoutita: $3(\text{NiMg})\text{O}_2\text{SiO}_2\cdot 2\text{H}_2\text{O}$.

Se ha demostrado que las extracciones a partir del mineral limonítico son mayores que las que pueden ser obtenidas con las serpentinas, pero la recuperación que pueden brindarnos la mezcla de serpentina y limonita es superior a la obtenida con serpentina sola.

Se observa que la limonita se reduce hasta un 90 %, sin embargo, la serpentina no pasa de un 75 %. Se observa también que la mezcla de ambos da una buena extracción, por lo que en la práctica



se trabaja con una relación de 3:1, o sea tres partes de limonita por una de serpentina. Bajo esta combinación se pueden obtener extracciones de hasta un 84 %.

El calentamiento del mineral serpentínico es de suma importancia, ya que se ha verificado una correlación entre la velocidad de calentamiento durante la reducción y la liberación de agua combinada con el mineral, lo cual explica satisfactoriamente la razón del por qué cuando la velocidad de calentamiento es alta la recuperación es pobre.

Las moléculas de los silicatos complejos deben ir perdiendo el agua paulatinamente hasta el momento de su liberación total, que es cuando puede ser reducido el óxido de níquel (NiO) presente en ellos. Si en este momento la concentración de reductores no es suficiente, los óxidos se reagrupan nuevamente formando silicatos esta vez deshidratados que requieren condiciones mas severas de temperaturas para su reducción.

1.1.2 Factores que influyen en la reducción.

1. Temperatura
2. Granulometría.
3. Composición química del mineral alimentado.
4. Concentración de gases reductores.
6. Estabilidad en la alimentación.
7. Tiempo de retención.
8. Presión positiva dentro del horno.

1.1.2.1 Influencia de la temperatura

Este es un parámetro fundamental en todo proceso pirometalúrgico, ya que la temperatura facilita el cambio de estado o el debilitamiento de la estructura cristalina.

El perfil de temperatura se mantiene mediante la utilización de quemadores de petróleo PRIOR que se encuentran en la cámara de combustión. En las cuales se trata de mantener una relación aire petróleo que garantice la combustión incompleta, a la vez ayuda a enriquecer la atmósfera reductora dentro del horno, además en los hogares 4 y 6 se introduce aire secundario, proveniente del sistema de enfriamiento del eje central a través de un ventilador de pos-combustión, que lo



inyecta en los hogares anteriormente señalados, para reaccionar con el monóxido de carbono residual. Debido a esta reacción exotérmica se produce una cantidad de calor adicional que contribuye al calentamiento del mineral y a mantener el perfil térmico del horno.

Durante la operación se debe mantener un perfil de temperatura aumentado de abajo hacia arriba que garantice un calentamiento gradual para que la pérdida de agua de los silicatos no sea brusca y no se afecte la extracción del mismo.

1.1.2.2 Influencia de la granulometría

Por ser un proceso heterogéneo la granulometría influye determinantemente en los buenos resultados de la reducción. Las reacciones ocurren fundamentalmente en la línea divisoria de las fases y la velocidad de la reacción esta determinada por la penetración del gas al interior de la partícula. Si estas son pequeñas, aumentara la superficie activa del mineral, será mayor el contacto entre las fases, lo que incide directamente en la conversión de la reacción.

En la práctica se trabaja con una granulometría de 82 – 83 % de fracción 0,074 mm, con lo que se puede lograr extracciones de 77 % de níquel reducido para este proceso sin que el arrastre de polvo sea incrementado sustancialmente.

1.1.2.3 Composición de la materia prima

La composición química de la materia prima influye directamente en los resultados de la reducción. Atendiendo a esta se fijan las temperaturas en el horno y el régimen de calentamiento de mineral así por ejemplo, cuando el mineral es serpentinoso o sea que su contenido de hierro es bajo, el régimen de temperatura debe ser más alto, así como la concentración de reductores debe ser elevada para reducir el níquel en el momento de debilitamiento de los cristales por la expulsión de agua cristalina.

Para el mineral limonítico las condiciones de reducción pueden ser menos severas ya que estos minerales se reducen a menores temperaturas.

1.1.2.4 Concentración de gases

La reducción se lleva a cabo mediante el contacto de los gases reductores con el mineral. Ambas fases se ponen en contacto en la cama de mineral y las caídas de un hogar a otro.



Al encontrarse el petróleo aditivo en los hogares con temperaturas superiores a 350°C , comienza la descomposición del mismo, formándose el monóxido de carbono y el hidrógeno una vez reaccionado el carbono activo en la primera etapa de la cadena de reacción química, además la atmósfera reductora es enriquecida por el gas producto de la combustión incompleta en los quemadores de petróleo. La concentración de los gases influye directamente en la conversión del níquel.

1.1.2.5 Número de hogares

Este ha sido un factor de importancia en el desarrollo de los hornos modernos, ya que fue detectado que el número de caídas de un hogar a otro influía directamente en los resultados de la reducción debido a que en el momento de las caídas ocurre mayor contacto entre las fases, y las partículas son bañadas completamente por el gas reductor, calentándolas a la temperatura indicada y reduciendo el óxido de níquel. La reducción en la cama del mineral lleva el peso de la reducción alrededor de un 70 %.

1.1.2.6 Estabilidad en la alimentación

La inestabilidad en la alimentación al horno afecta directamente los perfiles de temperatura, y toda la operación, ya que al ocurrir una alteración en la carga se descontrolan todos los parámetros a controlar, y si en este tiempo al horno se le suministra más mineral que el fijado, los perfiles térmicos comenzarán a bajar y si ocurre lo contrario aumentan y ambas situaciones no son favorables ni para la concentración de reductores en el interior del horno, ni para su posterior proceso.

1.1.2.7 Tiempo de retención

En el horno este es un factor que de acuerdo a los principios teóricos de la tecnología incide en los resultados de la reducción por el grado de terminación de la reacción. Valor fijado a 70 minutos cuando el tonelaje es de 22 toneladas puesto que el valor del tiempo de retención para una velocidad de rotación del eje es de 1,23 r.p.m.



1.2.1.8 Presión positiva dentro del horno

El horno opera con una presión positiva de 2 a 2,5 mm H₂O para evitar que el aire atmosférico penetre al interior lo que provocaría la re oxidación del mineral.

Datos importantes de los Hornos Herreshof.

Los hornos Herreshoff de Nicaro, operan actualmente por encima de su capacidad de diseño, con diferentes tipos de minerales, después de una serie de modificaciones, los hornos operan hasta 20 t/h brutas y se ha investigado la posibilidad de alimentar hasta 25 t/h:

Tabla 2. Datos de los hornos Herreshoff de Nicaro

Productividad del Horno. (t/h)	20
Tiempo de residencia. (min)	70
Consumo de petróleo en combustión. (kg/t)	50-60
Consumo de petróleo aditivo. (kg/t)	25-27
Número de cámaras de combustión	8
Ley del mineral alimentado:	
Fe (%)	33 - 45
Ni (%)	1,10 - 1,45
SiO ₂ (%)	8 - 12
MgO (%)	4 - 7

En este capítulo se ha expuesto un resumen de las características más importantes del proceso de reducción de la planta de Hornos de la Empresa “Comandante René Ramos Latour” de Nicaro, además de antecedentes de investigaciones realizadas con el uso de petróleo aditivo como gas reductor, junto a los elementos a los cuales haremos referencia en lo adelante han dado motivos para considerar la optimización de portadores energéticos como uno de los temas de mayor relevancia en este tipo de proceso industrial.

Como ninguna de las investigaciones anteriormente determinan el contenido de carbono que interviene en el proceso de reducción con la utilización de petróleo aditivo, ni exponen vías para una utilización óptima de uno de nuestros principales portadores energéticos nos dejan definido el planteamiento del problema que nos hemos propuesto resolver en el presente trabajo.



2 MATERIALES Y MÉTODOS

En la Planta de Hornos se implementó el uso de petróleo aditivo en todos sus hornos (Tavío González G.2004), para esto se aprobó el Proyecto de Innovación Tecnológica de Generalización de la misma, propuesto por los compañeros del CEINNIQ en Abril del 2004 quienes conjuntamente con los compañeros del Grupo Eros de SERCONI, que fueron los encargados de elaborar el diseño y construcción de la romana capaz de ejecutar el lazo de control previsto para el mejor funcionamiento de la atomización de petróleo aditivo a través de las lanza automatizada.

Pretendemos evaluar el comportamiento del carbono en el proceso de reducción y así proponer posibles vías de ahorro del principal portador energético que utilizamos en este proceso teniendo siempre presente los altos precios que tiene el petróleo en el mercado mundial.

En el presente capítulo exponemos todos los materiales y métodos que utilizamos para la realización de este trabajo, así como el principio de funcionamiento y características principales de ellos.

Método de análisis y muestreo.

El método utilizado para el muestreo fue puntual, es decir, en los días 16 y 29 de mayo, y 2, 5 y 7 de junio se tomaron las muestras de mineral necesarias en los hogares 7, 13, 15 y 16 para determinar los siguientes parámetros.

1.1.3 Parámetros a controlar

- 1- Cantidad de níquel que se alimenta.
- 2- Cantidad de cobalto que se alimenta.
- 3- Cantidad de hierro que se alimenta.
- 4- Contenido de óxido ferroso que se reduce.
- 5- Cantidad de níquel, cobalto y hierro reducidos.
- 6- Contenido de carbono en el petróleo aditivo que se reduce.
- 7- Contenido de azufre en el mineral reducido.



1.1.4 Valoración de los errores posibles

Los parámetros anteriormente señalados, lo que ha sido objeto de control, puede que alguno sufra variaciones incongruentes producto de una reoxidación de la muestras tomadas en los hogares 7, 13, 15, 16 y en la descarga del enfriador, por lo que habría que tomar nuevamente la muestra.

1.1.5 Características del petróleo utilizado

Uno de los portadores energéticos que se hace referencia y cuya incidencia es significativa en la consecución eficiente del proceso de reducción de mineral es el petróleo tecnológico o Fuel Oil que se suministra a los hornos desde el tanque 4 a una temperatura de 90 a 100 °C tomándose muestras diariamente para determinar las características del petróleo utilizado.

Este se utiliza con 3 objetivos específicos:

1. Mezcla con el mineral como aditivo.
2. Generar gases reductores mediante la combustión incompleta.
3. Garantizar el perfil térmico en los hornos por medio de quemadores de alta presión.

Los objetivos 2 y 3 se logran por medio de la combustión incompleta que se produce en las diferentes cámaras que poseen los hornos como muestra la **tabla 5**.

Tabla 3 Características del petróleo.

Fecha	Viscosidad		H ₂ O	A.P.I.	Densidad	Cont. azufre	Consumo de petróleo en la planta en kg/t	
	50 °C	100 °C	%		g/cm ³	%	Cámaras	Aditivo
16-may	340,7	35,9	0,1	7,27	0,9587	1,9	53,51	26,90
29-may	315,2	41,5	0,3	9,02	0,9639	1,8	54,24	26,62
02-jun	442,4	41,0	0,1	6,78	0,9676	2,1	53,02	26,78
05-jun	519,8	42,9	0,1	11,0	0,9645	2,1	53,33	26,15
07-jun	538,7	39,1	0,1	5,31	0,9606	2,2	53,59	26,18



Como se puede apreciar en la **tabla 3** los consumos de petróleo tanto en cámara como en aditivo se encuentran por debajo de 54,5 y 27 esto es producto de que todos los parámetros del combustible utilizado estaban dentro de la norma.

2.1.4 Muestreo y análisis de los gases

Para determinar la composición de los gases presentes se utilizó el analizador tipo ORSAT, mediante el cual se determina la concentración de dióxido de carbono (CO_2), monóxido de carbono (CO) y oxígeno (O_2) presentes en las diferentes cámaras y en el hogar 10, por lo cual describimos el principio de funcionamiento del analizador ORSAT.



Figura 1 Analizador orsat.

La botella C que contiene agua se comunica con la bureta B por un tubo de caucho, levantando o bajando la botella se hace que el agua entre en la bureta o salga de ella.

Para analizar se desaloja primero el aire de la bureta y de los conductos a pasos anexos empujándolos con el agua de C, luego se introduce en la bureta B una muestra del gas analizar, durante estas operaciones preliminares las válvulas de aguja que establecen la comunicación con los recipientes de las disoluciones de D, E, F, G y H han sido cerradas. Después con la válvula N_1 abierta se obliga a la muestra de gas de la bureta B entrar en el recipiente D levantando la botella C. En D hay una solución de hidróxido de potasio que absorbe el anhídrido carbónico de los gases, dejando pasar sin alterarlos a otros constituyentes.

El gas restante se retorna a la bureta B bajando la botella C y se anota la pérdida del volumen del gas. En forma sucesiva se obliga al gas a entrar en los recipientes E, F y G en el primero hay una solución la cual absorbe el oxígeno (pirogálico), en F una disolución de cloruro cuproso en



amoníaco la cual retendrá el monóxido de carbono y en G una solución acuosa para analizar el hidrógeno por lo que se hace pasar a esta bureta cierta cantidad de aire, tomamos la mitad del gas de los análisis anteriores y los hacemos pasar lentamente a la bureta G la cual posee en su interior un filamento que ha sido previamente encendido al conectar al circuito de corriente eléctrica el transformador A. Esta operación de dejar entrar y salir la mezcla de gases de la bureta G se repite dos o tres veces, siempre lentamente para quemar todo el hidrógeno contenida en la misma, luego desconectamos la corriente y dejamos enfriar los gases que quedan en la bureta G haciéndolos pasar después de fríos a la bureta B, la cual indicara la pérdida de volumen o lo que llamamos "contracción".

Al analizar el hidrógeno puede formarse dióxido de carbono, para analizar el mismo se hace pasar, el gas que nos queda, varias veces por la solución de potasio, la pérdida de volumen en la bureta B nos dice la cantidad de dióxido de carbono.

1.1.6 Muestreo y análisis del mineral

Mineral alimentado

A la muestra se le denomina R-10 y se toma en la parte inferior de las romanas mediante un pequeño sinfín, en una hora determinada se toma una muestra, la cual se envía para analizar el contenido de carbono, el porcentaje de níquel, hierro y azufre que se alimenta, esta se toman cada 1 hora la cual se hace un compósito del turno.

Mineral reducido.

La muestra de mineral reducido, al igual que la del muestreador continuo se tomo a una hora determinada, para ello utilizó un sinfín manual situado a un lateral de los hogares 7, 13, 15, 16 y en la descarga del enfriador 11, enviándose al laboratorio para el análisis del porcentaje de carbón, níquel y cobalto reducido.

La muestra seca a la salida del enfriador se lixivia con el procedimiento para determinar la calidad del mineral reducido en el laboratorio del CEINNIQ para la determinación de las extracciones de níquel y cobalto además de realizar los análisis correspondientes al mineral reducido tomado en los hogares.



Descripción de la calidad del mineral reducido

Tomar un kitasato con capacidad de 300 - 400 gramos de mineral reducido (puede ser de los coolers u hogares del horno). El recipiente tiene que estar provisto de un tapón de goma lo suficientemente ajustado y de un pedazo de manguera en el tubo lateral con una presilla ajustada de forma tal que no haya posibilidad alguna de entrada de aire para evitar la reoxidación del mineral.

Purgar con gas inerte el interior del kitasato, mediante una corriente que se hará fluir a través del tubo lateral, extrayendo en este momento el tapón de goma de la boca del kitasato y colocándolo cuando se haya evacuado todo el aire, quedando el recipiente cargado de gas inerte.

Tomar la muestra y manipular con sumo cuidado para evitar la reoxidación del mineral.

Los parámetros para la realización de la prueba son:

Relación líquido/sólido: 14 g/L

Tiempo de retención: 2 h y 45 min

Aire: 0,64 m³/g

Concentración de amoníaco en el licor fresco entre 100 - 120 g/L.

Concentración de CO₂ de 60 - 70 g/L.

La parte práctica operacional se realiza mediante el siguiente procedimiento.

Medir en un vaso de precipitado de 400 mL de licor fresco y se tara en una balanza analítica. Con sumo cuidado, por el tubo lateral del kitasato se introduce una pequeña corriente de gas inerte, aflojando la pinza de forma tal que exista una presión positiva dentro del mismo. Se saca el tapón de la boca de este y se coloca un sinfín preparado para tal efecto y el otro tramo de manguera de gas inerte se coloca en una entrada que posee el sinfín.

El vaso de precipitado que contiene el licor, y que ha sido previamente tarado, se coloca en la balanza y mediante el sinfín se pesan 100 g del mineral reducido que contiene el kitasato. Los 1000 mL restantes de licor fresco, medidos en una probeta de boca ancha, se van mezclando con el contenido del vaso de precipitado y se depositan en el turbo de banco enjuagándose, de tal



forma que no quede mineral en el recipiente. Se ajusta el agitador a la mazorca del motor, se tapa y se agita durante 2 h y 45 min.

El aire se introduce mediante un burbujeador lateral que posee el turbo, y que consiste en un tramo de tubo que descarga en el fondo de este, el aire se mide mediante un rotámetro colocado en la línea de flujo de aire, regulando la cantidad de aire por gramos de mineral reducido.

Mediante un sifón acoplado a un elermeyer se extrae 300 mL de pulpa, se filtra, se lava la torta con agua amoniacal de 30 g/L dos o - tres veces, asegurándose que quede bien lavada, extrayendo todo el licor embebido que fue arrastrado por la pulpa. Cuando el licor de lavado salga completamente claro, debe añadirse otra cantidad pequeña como medio de seguridad de la pureza de la torta.

Luego del filtrado se extrae la torta del embudo y se coloca en un vidrio reloj y se pone a secar en la estufa. Una vez seca la torta se tritura en un mortero de porcelana, se vierte en un sobre, se identifica con el número de orden correspondiente y se envía al laboratorio analítico para su posterior análisis.

El operador debe tener en cuenta a la hora de pesar la muestra de la calidad del mineral reducido, se toma una muestra del mineral reducido para su análisis como muestra cabeza, y otra para hierro metálico en un elermeyer con sulfato de cobre tomado previamente. Este es indispensable para los cálculos del extractable posterior al lixiviado del mineral.

La muestra cabeza se toma en un pomo pequeño, el cual se tapa y se envía al laboratorio para ser analizados los contenidos de Ni, Co, Fe, Fe⁺⁺ en el mineral reducido.

Para los cálculos del extractable del horno así como para determinar este valor de forma teórica se utilizaron las siguientes fórmulas:

$$\text{Ext. Horno } 21 = [1 - (\text{Ni}_{\text{red}} * \text{Fe}_{\text{alim}} / \text{Ni}_{\text{alim}} * \text{Fe}_{\text{red}})] * 100$$

$$\text{Ext. Teórico} = \text{Exp} (4.423344 + 0.05124) * \text{LN} (\text{número de mineral procesado})$$

Teniendo presente que el número de mineral se calcula por la siguiente formula:

$$\text{Número de mineral} = \% \text{Ni}_{\text{alim}} * \% \text{Fe}_{\text{alim}} / \% \text{SiO}_2 * \% \text{MgO}.$$

Ni_{red} níquel reducido



Ni_{alim} níquel alimentado

Fe_{alim} hierro alimentado

Fe_{red} hierro reducido

2.2 Características técnicas del horno 21

Para realizar este trabajo y obtener los datos necesarios para el análisis del contenido de carbono en el mineral con la utilización de petróleo aditivo se utilizó el horno 21 de planta nueva, por poseer una cierta estabilidad en su productividad así como en su funcionamiento y tener habilitados los muestreadores en los diferentes hogares.

El horno 21, Chequeo del estado técnico.

Al realizar el chequeo del estado técnico se detectó:

- Tiene ocho cámaras de combustión en operación, 6N, 8S, 10N, 10S, 12N, 12S, 14S y 15N.
- Seis cámaras con termopares tipo B, 10N, 10S, 12N, 12S, 14S, 15N.
- Transportador “jacoby” en buenas condiciones técnicas.
- Enfriador rotatorio “cooler” en buen estado técnico.
- Completo de brazos y dientes en todos los hogares.

Características técnicas y funcionamiento de las lanzas automáticas.

La lanza automatizada consta de los siguientes equipos: Romana inteligente con controlador, válvula automática, contador de flujo de petróleo con señal eléctrica de salida entre 4 – 20 MA, electro válvulas y trampa para la línea de vapor y petróleo con sus correspondientes bypass para casos de trabajo con operación manual y una presión de suministro de 280 KPa como mínimo, como se muestra en la **figura 2**.



Figura 2. Muestra de un sistema de instalación de la lanza automática.

La romana fue diseñada para este trabajo por el Grupo de Automatización de SERCONI radicados en Nicaro por la solicitud y sugerencia de los compañeros del CEINNIQ.

Durante las pruebas realizadas en 1998 se corroboró la funcionabilidad de la lanza automatizada para diferentes situaciones de variaciones en el horno, respondiendo adecuadamente.

También se concluyó que la lanza automatizada puede sustituir la dosificación de petróleo en las correas calientes, siempre que se alcance la presión necesaria en la línea de petróleo. Los perfiles altos de temperatura en cámara y hogar, además de una dosificación adecuada de petróleo aditivo entre 2 – 2,5 %, este último valor para minerales de bajo contenido de hierro garantiza el cumplimiento del extractable teórico.

En el capítulo 2 se ha descrito los materiales y métodos empleados para la caracterización del comportamiento del carbono en el mineral con la utilización de petróleo aditivo que constituye el objetivo general del problema que nos hemos propuesto resolver con este trabajo.

Se hace un estudio de los métodos y equipos que fueron utilizados para el muestreo de los gases y el mineral, una valoración de los posibles errores que pueden ocurrir, valoramos las características del petróleo utilizado durante los días de muestreo, así como los parámetros que se determinaron en el proceso de muestreo y un análisis de las características técnicas de las lanzas automáticas y del horno 21 que son los principales equipos que se utilizaron para la ejecución del trabajo.



Se determinó que el horno 21 y el sistema de lanzas automáticas estaban en buenas condiciones para la realización exitosa del trabajo, se decidió comenzar el análisis del comportamiento del carbono en el mineral con la utilización de petróleo aditivo como agente reductor.



3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

En este capítulo se presentan los diferentes análisis realizados con el conjunto de datos seleccionados valorando los resultados de uno y otros valores. Estos resultados ponen de manifiesto la posibilidad de obtener mejores resultados en el proceso de reducción que enfrentamos.

En una primera parte se describe la actividad realizada, seguidamente se describen los resultados obtenidos y se hace una valoración de ellos y finalmente se describe como obtener mejores resultados en los parámetros de eficiencia y control de uno de los principales portadores energéticos que utilizamos en nuestro proceso de reducción además de una valoración de la parte medio ambiental y económica

Desarrollo del trabajo.

Se comenzó el muestreo del horno 21 el día 16 mayo del 2011, en el turno D que se encontraba de día. El horno con 8 cámaras en operación y 6 termopares y las características técnicas relacionadas en el apéndice anterior.

La dosis de petróleo aditivo igual a 2,3 % y 20 t/h. El horno disponía del perfil térmico y de gases a utilizar. Se utilizo petróleo regular o fuel oil en toda la investigación.

Se comenzó realizando muestreo de mineral reducido en los hogares, así como análisis químicos y de gases, para determinar el contenido de carbono para evaluar su comportamiento dentro del horno.

El próximo muestreo se realizó el día 29 de mayo con el turno D nuevamente en operación y como algo a señalar es que este día el horno se mantenía con 8 cámaras pero tenía 4 termopares ubicados en las cámaras 10 S, 12 N, 12 S, 15 N. La dosis de petróleo se mantuvo en 2,3 % y 20 t/h, el día 2 de junio con el turno A en operación que es cuando se toma la próxima muestra el horno operaba normalmente con las 8 cámaras y solo con dos termopares ubicados en las cámaras 10S y 15 N el petróleo aditivo se mantuvo en el mismo valor y se operaba a 19 t/h.

El día 5 de junio se tomo otra muestra con el turno A trabajando, pero las condiciones técnicas del horno habían cambiado pues tenia 7 cámaras en operación y un solo termopar ubicado en la cámara 15 N aquí se vario la dosis de petróleo aditivo y se puso en 2,5 % y trabajaba a 19 t/h, con



esa misma dosis de petróleo aditivo y 18 t/h se realizo la muestra del día 7 de junio con el turno C laborando, pero las características técnicas del horno seguían disminuyendo pues ese día tenía solo 6 cámaras en operación y un solo termopar ubicado en la misma cámara relacionada anteriormente.

Debemos señalar que durante todo el periodo de muestreo el nivel de inventario en silos fue totalmente insuficiente, lo que provocó que en ocasiones se trabajara con mineral de recicló cuyo contenido de carbono oscila entre 6 y 9 % además de que es un mineral parcialmente reducido y luego oxidado y su reducción es muy baja, la **tabla 4** muestra el inventario existente esos días en los silos.

Tabla 4 Inventario en silos

Días	Inventario silos planta nueva (t)
16 de mayo	40
29 de mayo	168
02 de junio	146
05 de junio	25
07 de junio	124

Los días 16 de mayo y 5 de junio del 2011, aunque el inventario era insuficiente, el bombeo de mineral desde secadero se comportó de una forma estable no siendo así el resto de los días que se realizó el muestreo.

Los valores de los gases realizados en el hogar 10 se pueden encontrar en la **Tabla 5**.



Tabla 5 Perfiles gaseoso en el hogar 10.

Fecha	HOGAR 10		
	CO (%)	CO ₂ (%)	Relación (%)
16-may	13,2	12,2	1,08
29-may	12,8	11,4	1,13
02-jun	13,4	12,6	1,06
05-jun	10,6	10,2	1,04
06-jun	10,8	10,2	1,06

En la tabla anterior como se hace referencia a los perfiles gaseosos del horno 21 en el hogar 10, la menor concentración de CO aunque la relación se comportó en valores entre 1.00 y 1.20 fue el día 5 de junio debido a que se estaba operando con 25 t de inventario en los silos y el mineral de reciclaje no tenía una buena homogenización.

1.1.7 Operación del Horno

Parámetros de operación del horno a controlar.

-Perfiles Térmicos hogares:

Hogares	Bajos °C	Altos °C
H-4	650	750
H-6	650	750
H-9	660	690
H-11	690	710
H-13	710	730
H-15	750	770

-Perfiles térmicos cámaras

Cámaras	Bajo °C	Alto °C
H6-H8	1380	1400
H10-H15	1350	1380



- Temperatura de descarga del enfriador menor de 180 °C
- Presión en el hogar 0 de 10 - 12 mm H₂O y presión en el hogar 16 de 1,5 - 2,5 mm H₂O
- Tonelaje menor o igual a 20 t/h
- Consumo específico de petróleo aditivo 25 - 27 kg/h
- Consumo específico de petróleo en cámaras de 54 - 56 kg/h.
- Porcentaje de monóxido de carbono en cámaras 15 % y en el hogar 10 una relación CO₂/CO de 1.00 - 1,20.

El horno operó a 20 t/h los días 16 y 29 de mayo, el día 02 de junio con 19 t/h y los días 05 y 07 de junio con 18 t/h un promedio de 19.2 t/h para los 5 turnos monitoreados y muestreados.

Tabla 6 Parámetros de operación.

Fecha	Turno	TH4 %	TH6 %	TH9 %	TH11 %	TH13 %	TH15 %	TDESC %	PH0 mm H ₂ O	PH16 mm H ₂ O	% PET ADIT	Carga t/h
16-mayo	D-D	767	687	671	706	720	764	188	13.2	4.6	2,30	20,0
29-mayo	D-D	674	737	679	715	704	774	195	13.6	4.7	2,30	20,0
02- junio	A-D	682	660	655	700	683	758	182	12.8	3.8	2,30	19,0
05-junio	A-D	715	732	705	717	702	757	171	12.5	3.2	2,50	18,0
07-junio	C-D	781	742	667	701	685	762	187	12.3	2.9	2,50	18,0

TH temperatura de hogar °C

TDESC temperatura de descarga del enfriador °C

PH presión del hogar cero y del hogar 16 mm H₂O

Los perfiles térmicos durante los 5 días cumplieron con los parámetros de operación, así como la temperatura de descarga del enfriador que todo el tiempo se mantuvo con valores en el rango establecido y la presión de los hogares 0 entre 12,3 - 13,6 y en el hogar 16 con valores entre 2,9-



4,7 y por encima del rango establecido principalmente la presión del hogar 16, los demás parámetros o sea el tonelaje de 18 – 20 t/h y el porcentaje de petróleo aditivo de 2,3 – 2,5 %.

En la **tabla 7** se muestran los resultados de las extracciones de níquel y cobalto en el muestreo efectuado, así como el extractable teórico, además de las diferencias entre el Extractable Teórico y el real durante este período

Tabla 7 Resultado del extractable de níquel, cobalto y diferencia respecto al extractable teórico.

Fecha	Turno	Ext. % Enfriador11		Ext.% Ni	Dif % Ni
		Ni	Co	Teórico	Teo- Real
16-mayo	D-D	79,1	54,3	83,5	4,4
29-mayo	D-D	77,3	62,0	80,5	3,2
02-junio	A-D	84,0	58,4	86,5	2,5
05-junio	A-D	62,5	45,6	85,8	23,3
07-junio	C-D	76,5	55,7	85,2	8,7
Máximo		84,0	62,0	86,5	2,5
Mínimo		62,5	45,6	80,5	18,0
Promedio		75,9	55,2	83,8	7,9

Como se puede apreciar la diferencia mayor es el día 05 de junio producto de inestabilidad en la planta de secaderos coincidiendo con niveles sumamente bajos en el inventario existente en los silos por lo que el horno operó con mineral de recicló que es un mineral de bajo peso volumétrico por lo que la romana no lo contabiliza, existiendo variación en la alimentación y en los perfiles térmicos.

El muestreo seco realizado el día 05 de junio tanto a la salida del enfriador como en los hogares, no se tomó la cantidad de muestra necesaria para todas las determinaciones (Análisis químicos del mineral reducido, prueba de calidad), resultó muy difícil por lo engorroso de la tarea al existir altas temperaturas y contaminación casi constante de gases y polvos además por la poca cantidad de mineral reducido que descargan algunos muestreadores, no obstante siempre pudo realizarse



los análisis de azufre y carbono., en el hogar 9 no se pudo tomar muestra porque existe un objeto en interior del horno que imposibilita la entrada del muestreador y el hogar 11 no se pudo muestrear porque el muestreador quedo deteriorado en la camisa fabricada para el montaje de los mismos, además el análisis de gases de los hogares no se pudo realizar porque los tomas muestras están en malas condiciones y se tupian constantemente, únicamente se pudo realizar en el hogar 10.

Análisis de los resultados.

A continuación se dan los resultados de los valores del muestreo del mineral alimentado y reducido del horno 21.

En la **Tabla 8** se muestran los contenidos de Ni, Co, Fe, SiO₂, MgO, C Y S del mineral que se alimenta al horno 21.

En la **tabla 9** se muestra el contenido de Ni, Co, Fe, Fe⁺⁺, Fe^o, C , S y el extractable de Ni y Co en la descarga del cooler 11.

Tabla 8 Contenidos promedios, máximos y mínimos del mineral alimentado al horno 21.

	Mineral Alimentado Horno 21						
	Análisis químicos %						
	Ni	Co	Fe	SiO₂	MgO	C	S
Máximo	1,12	0,133	44,7	13,1	7,2	1,21	0,260
Mínimo	0,90	0,092	33,1	7,1	3,3	0,17	0,120
Promedio	1,00	0,110	38,9	8,8	4,8	0,43	0,214
Nº de Muestra	5	5	5	5	5	5	5

Tabla # 9. Composición promedios, máximos y mínimos del mineral reducido del Cooler 11.

	Mineral Reducido Cooler 11							Ext.	
	Análisis químicos %							Cooler 11	
	Ni	Co	Fe	Fe⁺⁺	Fe^o	C	S	Ni	Co
Máximo	1,02	0,121	42,3	24,5	3,28	2,77	0,52	84,0	62,0
Mínimo	0,83	0,105	37,7	16,2	2,31	1,72	0,42	62,5	45,6
Promedio	0,95	0,113	40,0	21,6	2,78	2,33	0,49	75,9	55,2
Nº de Muestra	5	5	5	5	5	5	5	5	5



Se aprecia la baja reducción del mineral donde aparecen valores bajos del hierro ferroso y del hierro metálico para minerales con contenidos de hierro alimentado entre 44,7 % - 33,1 % y como promedio 38,9 %.

Este resultado es producto del mineral de recicló, el cual operara el horno 21 con bajos inventarios en los silos lo que provocó una inestabilidad en la operación.

El porcentaje de petróleo aditivo en el mineral alimentado es de 2,33 %. Además esos valores pueden resultar mayores pero al procesar el mineral de recicló que contiene entre un 6 -9 % de carbono y es un mineral parcialmente reducido y luego oxidado con bajo peso volumétrico, alimentado al horno sin mezclar con el mineral que proviene de la planta de preparación de minerales que es como esta orientado, pero muchas veces se incumple por niveles sumamente bajos de inventario, provoca inestabilidad en la operación.

1.1.8 Perfiles de mineral reducido en el horno

De los perfiles de reducción realizados el más demostrativos es el día 29 de mayo donde los valores de carbono se muestran en forma ascendente de hogar en hogar y fue el día que los silos tuvieron el mayor inventario, por lo que la operación fue la correcta y los perfiles de temperatura se mantuvieron estables manifestándose en las extracciones de níquel y cobalto de ese día y el mas bajo fue el del día 05 de junio con 25 t de inventario en los silos y la planta de secaderos con grandes niveles de inestabilidad, además fue el día de mas bajo porcentaje de hierro dos, hierro metálico y carbono en el mineral reducido lo que da muestra de falta de reductores en el mineral procesado producto de la inestabilidad anteriormente relacionada.

Las **figura 3** muestran el porcentaje de carbono y el comportamiento del hierro dos en los diferentes hogares, el extractable del níquel y el cobalto y el comportamiento del hierro metálico para (el día 16 de mayo).

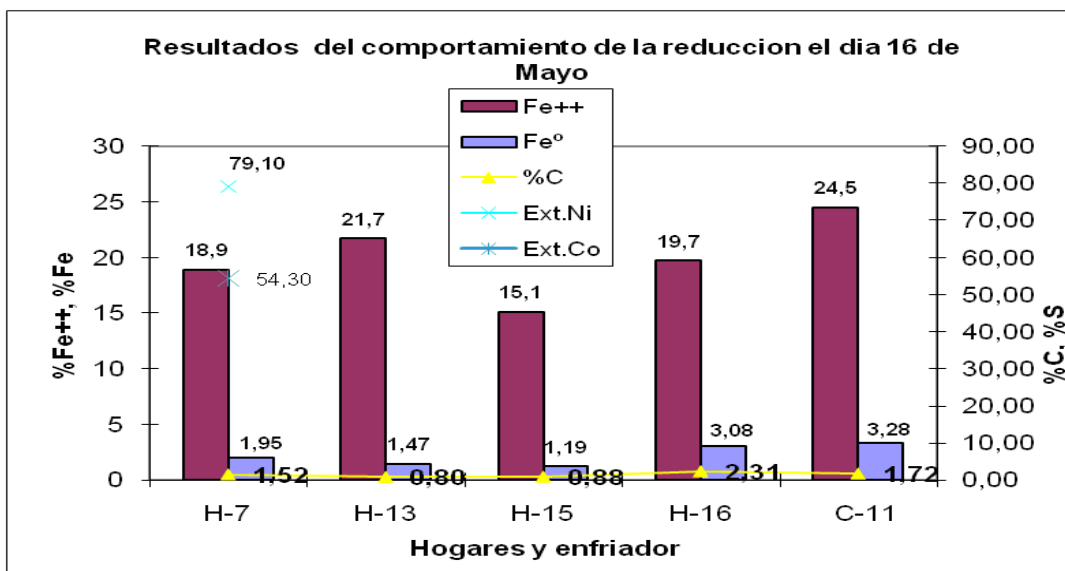


Figura 3 Muestra el porcentaje de carbono, hierro ferroso, hierro metálico y los valores del extractable del níquel y el cobalto (el día 16 de mayo).

Como se puede observar existe una disminución del porcentaje de carbono y el hierro metálico en los hogares 13 y 15 que puede ser producto de una reoxidación de la muestra tomada, en el hogar 15 también se observa una disminución del ferroso aunque los valores del extractable del níquel y el cobalto están acordes a los resultados expuestos, se puede asegurar que la reducción continúa hasta el enfriador pues los valores de los parámetros analizados así lo describen.

Las **figura 4** muestran el porcentaje de carbono y el comportamiento del hierro dos en los diferentes hogares, el extractable del níquel y el cobalto y el comportamiento del hierro metálico para (el día 29 de mayo).

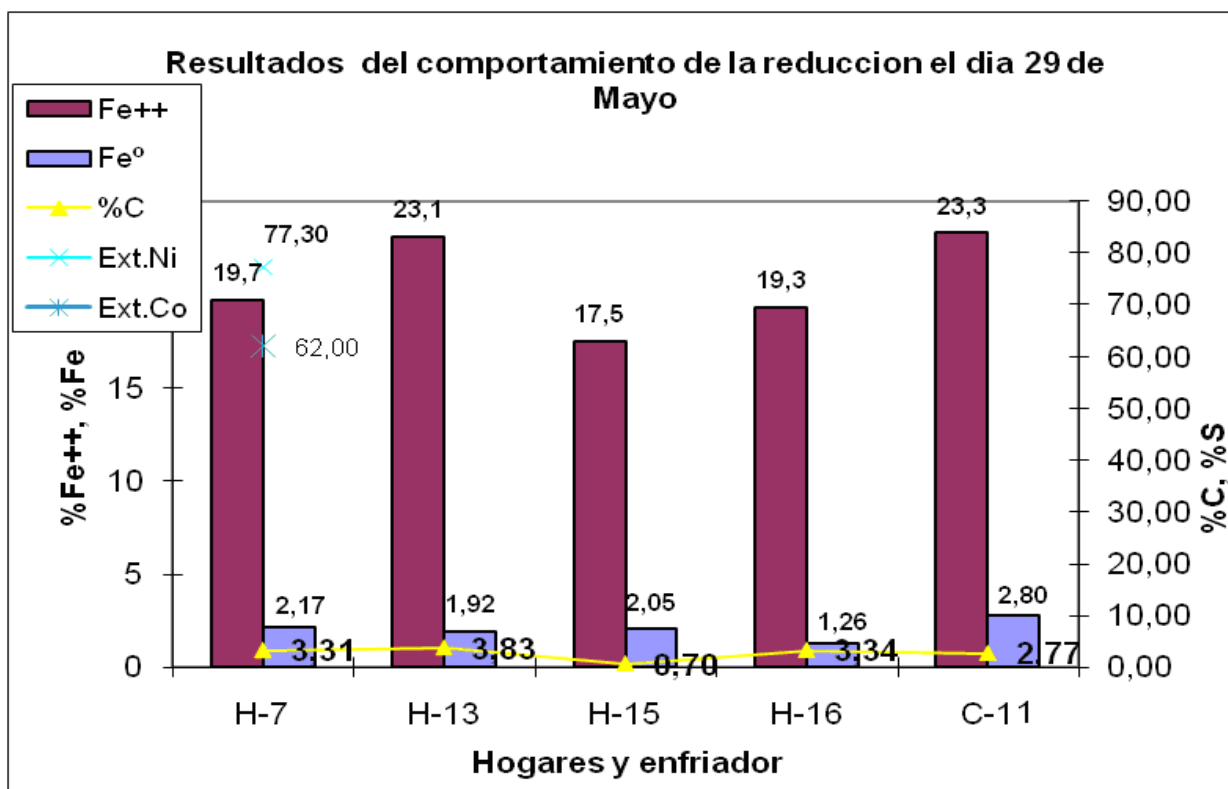


Figura 4 Muestra el porcentaje de carbono, hierro dos, hierro metálico y los valores del extractable del níquel y el cobalto (el día 29 de mayo).

En la **Figura 4** se observa una disminución del porcentaje de carbono y del hierro dos en el hogar 15 que sucede porque en el momento del muestreo de ese hogar el operador B de plantas metalúrgica se encontraba limpiando el quemador situado en la cámara H-15 norte, los valores del extractable de níquel disminuyen teniendo en consideración que la operación se realizaba con mineral de reciclaje que es un mineral reducido y parcialmente oxidado y que es muy difícil volver a recuperar los metales del mismo.

Las **figura 5** muestran el porcentaje de carbono y el comportamiento del hierro dos en los diferentes hogares, el extractable del níquel y el cobalto y el comportamiento del hierro metálico para (el día 2 de junio).

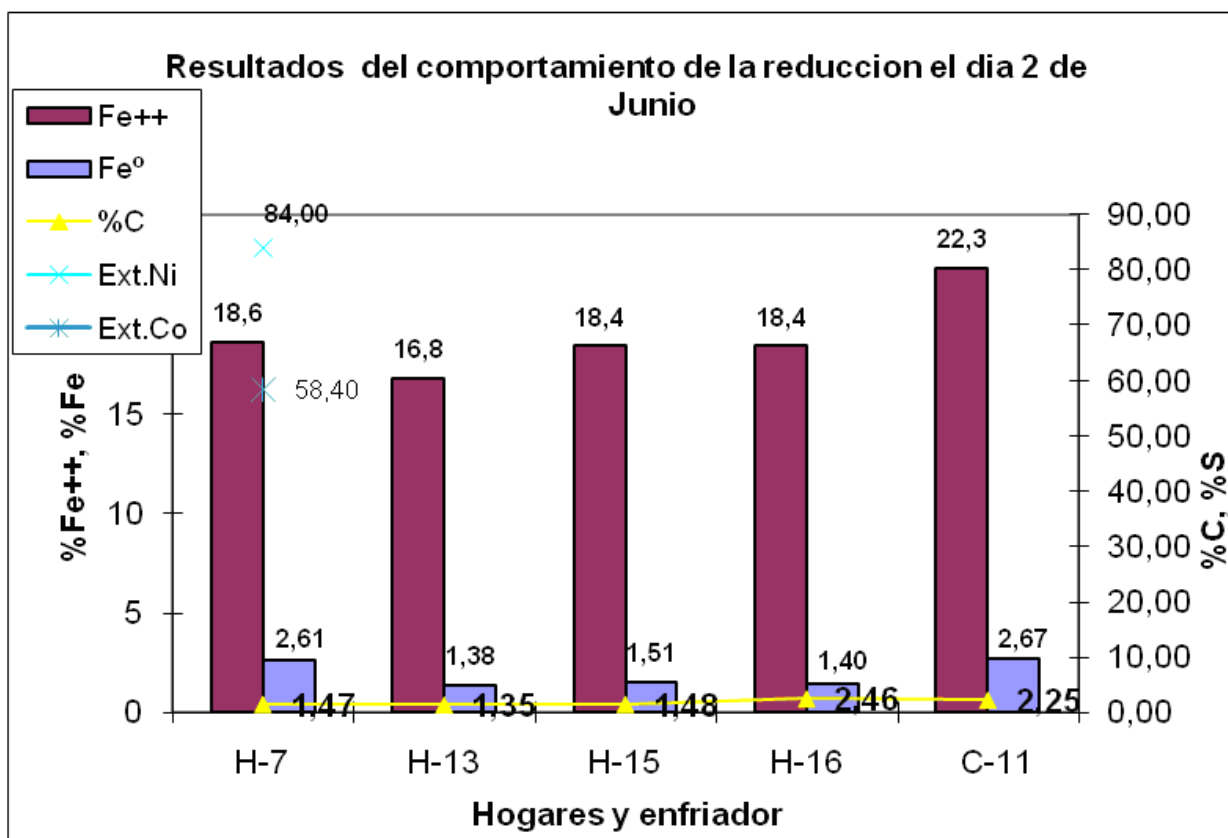


Figura 5 Muestra el porcentaje de carbono, hierro dos, hierro metálico y los valores del extractable del níquel y el cobalto (el día 2 junio).

En la **Figura 5** Se aprecia que los resultados del extractable fueron mayores, los parámetros antes señalados se comportaron con estabilidad coincidiendo que fue cuando el inventario de los silo fue mayor, hubo estabilidad en la operación y el mineral de reciclo se operó mezclado con el que envía la planta de beneficio de minerales.

Las **figura 6** muestran el porcentaje de carbono y el comportamiento del hierro dos en los diferentes hogares, el extractable del níquel y el cobalto y el comportamiento del hierro metálico para (el día 5 de junio).

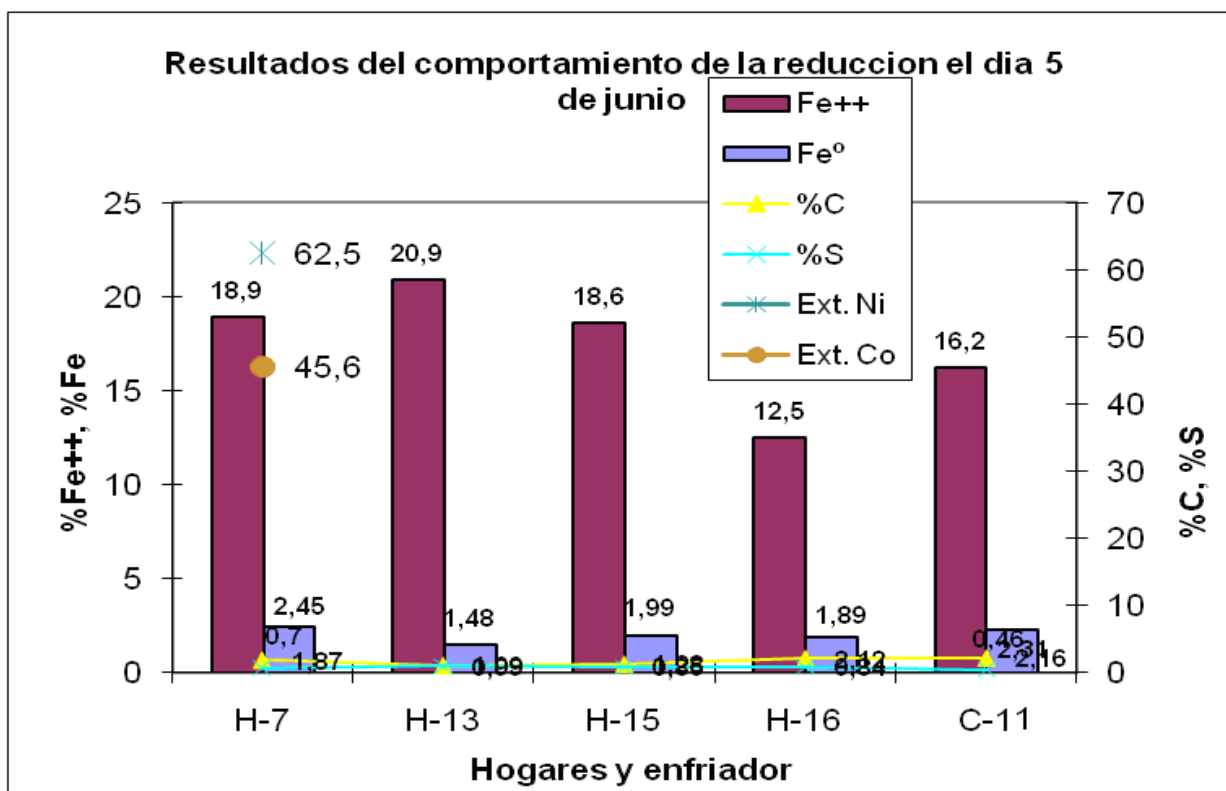


Figura 6 Muestra el porcentaje de carbono, hierro dos, hierro metálico y los valores del extractable del níquel y el cobalto el día 5 de junio.

En la **Figura 6** se observa que los resultados fueron malos, los valores de porcentaje de carbono, hierro dos y hierro metálico en el mineral reducido fueron los mas bajos coincidiendo con poco inventario de mineral y presencia de mineral de bajo peso volumétrico con las condiciones señaladas anteriormente, además se puede observar que fue este día el valor mas bajo de los extractables de níquel y cobalto lo cual se adjudica a la utilización de un mineral con las condiciones señaladas anteriormente y la operación ser totalmente inestable.

Las **figura 7** muestran el porcentaje de carbono y el comportamiento del hierro dos en los diferentes hogares, el extractable del níquel y el cobalto y el comportamiento del hierro metálico para (el día 7 de junio).

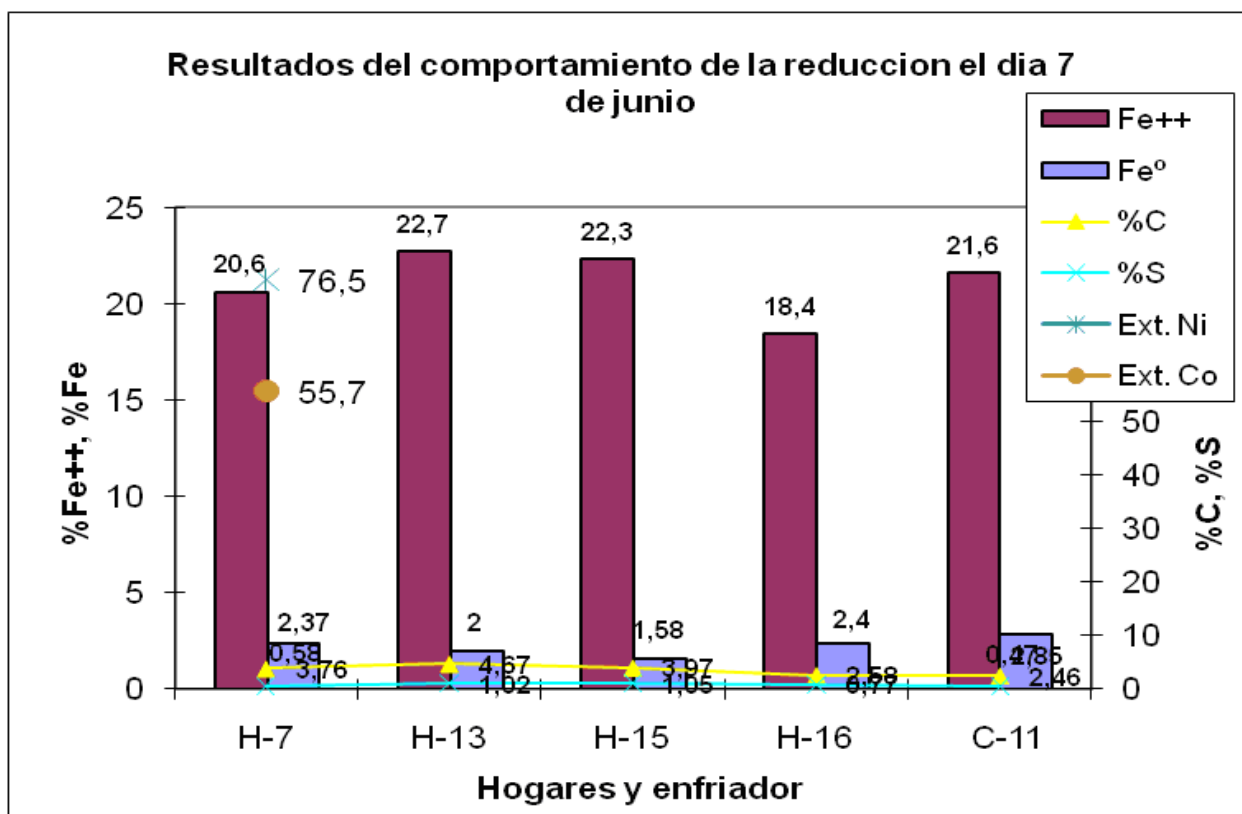


Figura 7 Muestra el porcentaje de carbono, hierro dos, hierro metálico y los valores del extractable del níquel y el cobalto (el día 07 de junio).

En la **Figura 7** muestra que aunque los valores del porcentaje de carbono dieron valores fuera de lo normal y el hierro metálico y el hierro dos tienen valores aceptables sin embargo los porcentajes de extractable aunque fueron superiores que el día anterior, aún tienen valores por debajo de los deseados, los valores de carbono se producen por la utilización de mineral de bajo peso volumétrico, cuyo contenido de carbono oscila entre 6 – 9 % pero es un mineral muy difícil de volver a reducir puesto que es un mineral reducido y parcialmente oxidado.

Las **figura 8** muestra los resultados promedios del hierro dos en los diferentes hogares, el hierro metálico, carbono y azufre.

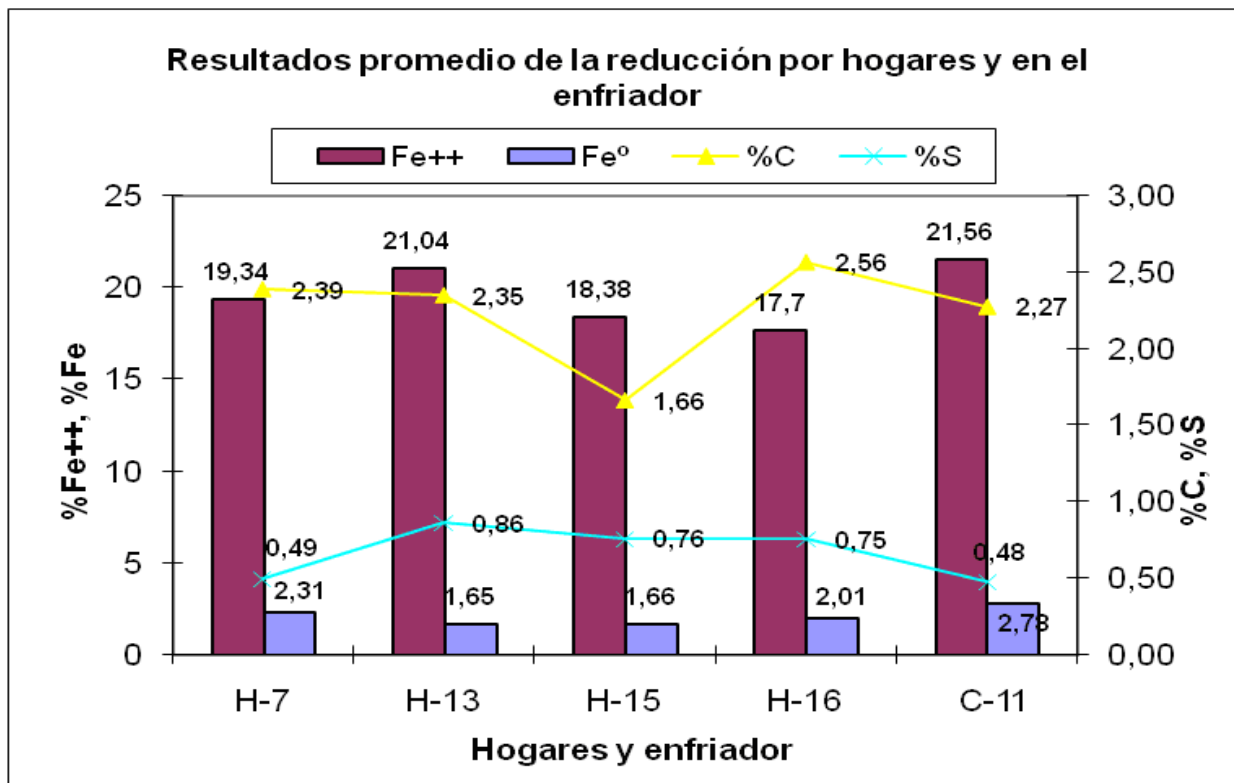


Figura 8 Valoración de los resultados promedios de la reducción por hogares y en el enfriador donde se observa de una forma mucho mas exacta todo lo anteriormente relacionado.

En la **Figura 8** se puede observar que la reducción continúa hasta el enfriador puesto que los valores de azufre que en los primeros hogares tiene valores altos se observa como en el mineral reducido ha bajado a niveles permisibles para estos procesos en todos los perfiles realizados y aunque el carbono se comporta de manera ascendente señalamos que existe un porcentaje del petróleo que no combustiona y por tanto imposibilita en alguna medida el contacto gas-sólido y por lo que afecta las extracciones esto se podría evitar aumentando las temperaturas en las cámaras de combustión para lograr que la mayoría del petróleo que entra al horno combustione y se obtenga un contenido de carbono mayor e igual 1,8 % y menor o igual a 2,8 % y así mejorar el contacto gas-sólido que constituye otra característica importante en la obtención de buenos resultados y permitiría obtener valores de consumo de petróleo adecuados.



Valoración ambiental

Para hacer una valoración ambiental de la utilización del petróleo aditivo como agente reductor suministrado a los hornos por el sinfín alimentador y determinar la influencia que tiene el contenido de carbono en el petróleo aditivo con la utilización de este portador energético, comenzaría por los cambios que provocó en la tecnología el empleo del referido agente reductor entre las que se encuentran las siguientes:

- La temperatura del hogar 0 tubo aumentó de 100 – 150 °C
- La temperatura de descarga de los enfriadores tuvieron un aumento de alrededor de 45 °C.
- El porcentaje de monóxido de carbono en los gases de salida hacia el electrofiltro también se incrementaron a 2,5 %, así como la temperatura de entrada y salida del referido electrofiltro.

Esto ha provocado emanaciones por las chimeneas de los ventiladores de succión (M-2) al aumentar la temperatura del hogar 0 y con ello aumenta la temperatura de los gases de salida en la referida chimenea provocando emanaciones de polvo y gases de estas, al aumentar la temperatura de descarga de los enfriadores de mineral estos también contaminan el medio ambiente al tener emanaciones por la chimenea de estos y provocan desprendimientos de gases al reaccionar mineral con temperaturas superiores a las establecidas con los licores amoniacaes que circulan por las canales de contactos, el porcentaje de monóxido de carbono aumenta en los gases de salida hacia el electrofiltro y las temperaturas de entrada y salida sufren cambios bruscos se saca de proceso el filtro y se comienza a contaminar el medio ambiente en ocasiones por tiempos prolongados, por tanto se recomienda se evalúe nuevamente el cambio de posición de las lanzas automáticas y sean ubicadas nuevamente en el hogar 7.

En estos momentos se hacen estudios por parte de los compañeros del departamento técnico juntos a los especialistas de medio ambiente para buscar soluciones prácticas a esta problemática por lo que se espera que este trabajo colabore en las soluciones que propongan estos compañeros sobre todo porque quedó demostrado que una parte importante del petróleo que adicionamos no combustiona y puede en cierta medida estar provocando las alteraciones ya referidas y afectando al medio existente.



Valoración económica

Para hacer una estimación económica de los resultados obtenidos partiendo del concepto de lo que significa el cambio de la tecnología y el empleo óptimo de las lanzas automáticas para suministrar el petróleo adicionado y que actúa como agente reductor dentro del horno por lo que podemos decir que.

En estos momentos la lanza se muestra como el método más ventajoso por:

1. Las pérdidas de petróleo tienden a disminuir, ya que los volátiles no se pierden pues son aprovechados como calor al quemarlos en el hogar 4 y serían menores si se utilizara en el hogar 7
2. El costo de la inversión y mantenimiento es bajo.
3. Existe una larga experiencia de su uso en Nicaro como complemento con el gas reductor.
4. Las pruebas experimentales realizadas con la lanza automatizada son efectivas.

La utilización de la lanza automatizada mejoró la contabilidad metalúrgica, en la cual se han tenido que realizar correcciones del tonelaje, ley de Ni y Fe y humedad, debido a la presencia del petróleo en el mineral. Erradicó las dificultades que provocaba la dosificación de petróleo en las correas calientes, proporciona una ganancia como mínimo de 3 millones de dólares anuales al incrementarse la productividad de los molinos en un 10 %.

Además si se tiene en cuenta que existe un porcentaje de petróleo que no combustiona y que los consumo específico de petróleo aditivo y en cámara están dando valores superiores a los establecidos en 2 kg/h, valorando también que el precio del petróleo utilizado (Fuel oil) en el mercado mundial esta en los valores de 429,8 dólares la tonelada se podría decir que sin afectaciones a las extracciones se podría disminuir el porcentaje de petróleo aditivo en un 0,2 % y al completar los termopares de las cámaras y trabajar estas en los valores establecidos disminuiría el consumo en las cámaras hasta los valores deseados teniendo como referencia que el porcentaje de carbono en el mineral reducido dio valores promedios de 2,33 % y valorando que el trabajo se realizó con la utilización de mineral de reciclaje que posee las características relacionadas anteriormente, la planta lograría trabajar con mas eficiencia y mantendría el porcentaje de carbono en el mineral reducido en los valores deseados (1,8 - 2,8 %). Por lo que las extracciones de níquel



y cobalto se mantendrían o serían mayores, todo esto teniendo presente y valorando el tonelaje procesado por los hornos.

En este capítulo se hace un análisis de los diferentes parámetros que nos permiten conocer los valores del contenido de carbono en el mineral con la utilización de petróleo aditivo, además hacemos una descripción de la actividad realizada y se hace una valoración de los resultados obtenidos que permite resolver en parte el objetivo planteado, producto de la inestabilidad existente en la planta por el bajo inventario de mineral existente esos días y la inestabilidad de la planta de secaderos y molinos que posibilitó la utilización del mineral de reciclaje que es un mineral de bajo peso volumétrico, reducido y parcialmente oxidado y que por sus características es muy difícil volver a reducir los metales que contiene.

Se hace una valoración ambiental y económica que permite valorar el daño causado al medio ambiente existente y recomendar posibles soluciones para resolverlo, en la valoración económica se hace un estudio de las ganancias obtenidas con la aplicación de la nueva tecnología aplicada con la utilización de lanzas automáticas para adicionar el petróleo que interviene como agente reductor en el proceso, además se describe las posibles causas que pueden afectar el contenido de carbono en el mineral con la utilización de petróleo aditivo.



CONCLUSIONES

1. El valor promedio del contenido de carbono en el petróleo aditivo es de 2,33 % y el contenido de carbono en el mineral reducido a la salida del enfriador deben de estar en valores entre 1,8 - 2,8 %, porque a valores superiores aumenta el contenido de azufre en el lico producto y disminuye las extracciones de níquel afectando la destilación del licor incrementándose las pérdidas de amoníaco (torre de destilación).
2. Se notó una baja reducción del mineral donde aparecen valores bajos del hierro y del metálico para mineral con contenidos de hierro en el mineral alimentado entre 44,7 % - 33,1 % y como promedio 38,9 %. Este resultado es producto de la utilización de mineral de reciclaje durante el 60 % de los turnos muestreados, mineral que es muy difícil de volver a reducir.
3. El porcentaje de monóxido de carbono en los gases de salida hacia el electrofiltro se incrementaron ligeramente así como la temperatura de entrada y salida provocando emanaciones por las chimeneas de los ventiladores de succión (M-2) al aumentar la temperatura del hogar 0 y con ello aumenta la temperatura de los gases de salida en la chimenea provocando emanaciones de polvo y gases, al aumentar la temperatura de descarga de los enfriadores de mineral y tener contacto con los licores amoniacales que circulan por las canales desprenden gases que contaminan el medio ambiente al tener emanaciones por la chimenea.



RECOMENDACIONES

1. Evaluar nuevamente el cambio de posición de las lanzas automáticas y la determinación de su ubicación óptima (hogar 1, sinfín alimentador, hogar 7 o combinaciones de las mismas).
2. Incrementar el número de muestras tomadas, por lo menos durante 2 h de trabajo para cada prueba tomando muestras cada media hora, existiendo un período de tiempo estable en la operación de la planta.
3. Valorar la disminución de un 0,2 porciento del petróleo adicionado al horno por el sinfín alimentador, teniendo presente que permitiría la descomposición de una parte del petróleo que no lo hace y favorecería el insuficiente contacto gas-sólido, valorando en todo momento el tonelaje procesado por ellos.
4. Completar los termopares de las respectivas cámaras en operación en los hornos para garantizar valores de temperaturas que posibilite la descomposición del petróleo que actúa como agente reductor y lograr valores de consumo de petróleo adecuados. El horno operó entre 18 y 20 t/h, con un promedio de 19,2 t/h para los 5 turnos monitoreados y muestreados que resultan insuficientes para llegar a conclusiones definitivas.

Completar toda la instrumentación necesaria que permita un chequeo más exacto de todos los parámetros de la operación y así poder calcular los consumos de petróleo por planta y por horno.



BIBLIOGRAFÍA

1. MINBAS Empresa Comandante. René Ramos Latour. Manual de Dirección de la Producción. 2001.
2. Fernández Periche Francisco. Tesis Doctoral Aproximación funcional mediante redes de funciones de base radial, una alternativa para la predicción en el proceso de reducción de mineral de la tecnología Carón de producción de Níquel. enero 2008.
3. Paz del Valle M. Informe Etapa 01 del Proyecto de Generalización de las lanzas automatizadas. Febrero 2004.
4. Pineda Alex y León Esperanza. Trabajo de diploma "Recuperación del Calor en Hornos de Reducción y Planta Eléctrica. 1980
5. Tavío González G. Proyecto de Generalización del empleo de las lanzas automatizadas en la Planta de Hornos de Reducción. Septiembre 2003
6. Tavío González G. Informe Etapa 02 del proyecto de Generalización de las lanzas automatizadas. Marzo 2004.
7. Tavío González G. Operación de la Línea 1 de Hornos de Reducción con petróleo aditivo para evaluar el efecto de la supresión del gas reductor sobre la temperatura descarga del mineral. 1995.
8. Tavío González G. Operación de la línea 15 de Hornos de reducción para optimizar la operación combinada petróleo-gas y la operación con petróleo aditivo solamente. 1994.
9. Tavío González G. Optimización de la Reducción de níquel en los Hornos equipados con Cámaras Prior 1996-1999.
10. Tavío González G. Utilización de lanza automatizada para el suministro de petróleo aditivo a los Hornos de Reducción 1998-1999.
11. Rodríguez G. José y Castillo Días Ariel Trabajo de Diploma. Determinación de la eficiencia del Carbono en el proceso de reducción de los hornos de hogares múltiples de Nicaro con la utilización de gas pobre como agente reductor. Curso 1980-1981.