



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

IMPACTO DE LA ADICIÓN DIRECTA DEL PETRÓLEO ADITIVO SOBRE LOS PARÁMETROS TÉCNICO- ECONÓMICOS DE LOS HORNOS DE REDUCCIÓN

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Raiza Cecilia Campos Hernández

Moa

2012



Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
Dr. "Antonio Núñez Jiménez"
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia

IMPACTO DE LA ADICIÓN DIRECTA DEL PETRÓLEO ADITIVO SOBRE LOS PARÁMETROS TÉCNICO- ECONÓMICOS DE LOS HORNOS DE REDUCCIÓN

TESIS PRESENTADA EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO METALÚRGICO

Autor: Raiza Cecilia Campos Hernández

Tutores: Ing. Ladislao Campos Reyes

Ing. Orleidy Loyola Breffe

Moa

2012



PENSAMIENTO

“La educación es el arma más poderosa que tiene el hombre para crear una ética, para crear una conciencia, para crear un sentido del deber, un sentido de la organización de la disciplina, de la responsabilidad. “ Fidel Castro Ruz



DEDICATORIA

A MI MADRE:

POR SER PARTE INDISOLUBLE EN TODOS LOS ASPECTOS DE MI VIDA, SU INFINITO AMOR Y APOYO MIENTRAS VIVIÓ, POR SU INSPIRACIÓN DESPUÉS DE MUERTA



AGRADECIMIENTO

A LA REVOLUCION CUBANA: Por permitirme lograr este sueño anhelado por muchos años.

A MIS HIJOS, HERMANOS Y ESPOSO: Por su apoyo incondicional.

A MIS PROFESORES: Que lograron inculcarme el amor a la Metalurgia.



RESUMEN

El presente trabajo tiene como propósito, determinar teóricamente la influencia del petróleo aditivo inyectado directamente a los sinfines de los Hornos de Reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", sobre los parámetros técnico-económicos, en dependencia de la disponibilidad de cámaras, del extractable, así como el ahorro del portador energético. A través del método analítico de datos obtenidos del registro de operaciones de la planta, se analizaron los resultados del muestreo del trabajo real de 5 hornos en el mes de Mayo, que permitieron proponer las ventajas del sistema de adición directa con respecto al sistema de adición actual. De acuerdo a la disponibilidad de cámaras, se propuso que es posible regular la dosificación de petróleo en la alimentación, de manera que garantice los reductores necesarios. Se prevé garantizar una elevada eficiencia energética, con el aprovechamiento del petróleo dosificado según el tonelaje potencial de cada horno. Se eliminan las pérdidas de petróleo en el circuito Secaderos – Hornos de reducción, con el ahorro de más de 7 000 t/año de petróleo; y se prevé mejorar la contabilidad metalúrgica, al eliminar los errores o perturbaciones que se producen actualmente en los análisis químicos en las muestras a la entrada de los hornos. Se definió además que el sistema de adición directa no ejerce influencia significativa en el comportamiento del extractable.



SUMMARY

The present work you have like purpose, to determinate the influence of the additive oil once the endless quantities was given a shot directly of company Reductions' Ovens theoretically Ernesto Che Guevara, on the parameters technical economic, in dependence of the availability of cameras, of the extractable, as well as the energetic bearer's saving. Through the analytical method of data obtained of the record of operations of the plant, they analyzed the results of the sampling of the real work of 5 ovens in Mayo's month, that they allowed proposing the advantages of the system of direct addition regarding the system of present-day addition. According to the availability of cameras, he was offered that it is possible to regulate the dosification of oil in nutrition, so that you guarantee the necessary reducers. It is foreseen guaranteeing an elevated energetic efficiency, with the use of the oil dosed according to the potential tonnage of every oven. They eliminate the losses of oil in the circuit That Can Be Dried – Furnaces of reduction, with the saving of over 7 000 t year of oil; And it is foreseen improving the metallurgic bookkeeping, when eliminating errors or disturbances that take place at present in the chemical analyses in the signs to the entrance of the ovens. The fact that the system of direct addition does not exercise significant influence in the extractable's behavior defined itself besides.



ÍNDICE

	Pág.
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL	5
1.1. Antecedentes de la utilización del petróleo aditivo	5
1.1.1. Dosificación del petróleo aditivo.....	9
1.2. Características del mineral alimentado a los Hornos de Reducción.....	9
1.3. Proceso de Reducción en los Hornos de la Planta “Ernesto Che Guevara”.....	11
1.3.1. Principales transformaciones físico-químicas que ocurren en el horno	13
1.4. Parámetros que influyen en el proceso de reducción	16
1.5. Características y parámetros más importantes de los Hornos de Reducción de la Empresa “Ernesto Che Guevara “	18
Conclusiones parciales del capítulo I	21
CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS	22
2.1. Procedimiento utilizado	22
2.2. Procedimiento para el análisis del comportamiento del extractable	25
2.2.1. Procedimiento para tomar las muestras en el mineral de alimentación a la entrada de los hornos (HR-1).....	25
2.2.2. Procedimiento para tomar las muestras en el mineral reducido a la salida de los hornos (HR-4).....	26



2.2.3. Método de análisis químico.....	28
2.2.4. Valoración volumétrica para el Fe.....	29
2.3. Características del petróleo utilizado.....	30
2.4. Análisis y procedimiento para la contabilidad metalúrgica entre la muestra SM 8 y HR 1	30
2.4.1. Método para determinar el contenido de carbono en el mineral.....	31
Conclusiones parciales	32
CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS	33
3.1. Análisis de los resultados.....	33
3.1.1. Influencia de la disponibilidad de cámaras.....	33
3.1.2. Comportamiento del extractable	37
3.1.3. Influencia del sistema de adición directa en el ahorro de petróleo.....	40
3.1.4. Contabilidad metalúrgica de la mezcla entre SM-8 (Salida de Secaderos) y HR-1 (Entrada a los Hornos).	41
3.1.5. Valoración económica.....	42
3.1.6. Impacto medio ambiental.....	43
Conclusiones parciales del capítulo	44
CONCLUSIONES	46
RECOMENDACIONES	47
BIBLIOGRAFÍA	48
ANEXOS.	



INTRODUCCIÓN



INTRODUCCIÓN

La empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”, cuya estructura y producción ha sido comparada con otras fábricas a nivel internacional como: TOCANTINS en Brasil y QUEENSLAND en Australia, forma parte del conjunto de empresas encargadas de toda la producción de Ni + Co en Cuba, integrado además por la planta” Cmdte “Pedro Sotto Alba”, la cual produce sulfuro de Ni + Co y la empresa ” Cmdte René Ramos Latour” con un esquema tecnológico análogo a la “Ernesto Che Guevara”, situada en el municipio Moa, Provincia Holguín, donde los minerales oxidados de Ni, son tratados mediante el proceso Caron, basado en el esquema carbonato amoniacal del mineral reducido, obteniendo como producto final sínter de Ni + Co.

La producción de níquel constituye un rubro exportable y una de las fuentes de ingreso de divisa en nuestro país; representada por la Industria del Níquel, está llamada a consolidar nuestra economía, tratando de obtener valores mayores de eficiencia y productividad.

En los lineamientos económicos del último congreso del Partido Comunista de Cuba (abril 2011), se plantea mejorar la posición de la Industria del Níquel en los mercados, elevando la calidad de sus productos y reduciendo sus costos. Para lograr el cumplimiento de dichos lineamientos, se requiere que aparejado al crecimiento progresivo de la producción, se implanten y perfeccionen nuevos métodos de reducción y obtención del Ni + Co.

El mineral procedente de las reservas existentes en los yacimientos minerales del noreste oriental de Cuba, a cielo abierto, es transportado al depósito exterior, donde se mezcla la limonita y la serpentina en una relación (3:1) en proporción adecuada, constituyendo la materia prima que se utiliza para la obtención de Ni + Co, cuya



producción, destinada a la exportación, está obligada cada día a incrementar su calidad para poder competir en el mercado internacional.

El equipamiento tecnológico se distingue por la mecanización y automatización del esquema el cual admite la elevación de la mezcla del mineral limonítico y el serpentinitico, Como todo proceso industrial, se realizan diferentes análisis durante las distintas etapas por la que transita el mineral. Las muestras recibidas por el Laboratorio Central son analizadas por medio de diferentes técnicas analíticas instrumentales y es en la concentración de Ni y Co donde se centra el mayor interés.

Fundada en 1986, está compuesta por 7 plantas principales y otras plantas auxiliares de apoyo a la producción. Sus resultados productivos dependen de la estabilidad y eficiencia de dichas plantas, donde la de Hornos de Reducción tiene un papel determinante.

Los hornos de reducción son los encargados de reducir el óxido de níquel a su estado metálico, transformándolo para la lixiviación amoniacal. El mineral seco y molido, es aditivado con petróleo en las correas calientes de Secaderos, combustible necesario para la obtención de gases reductores. Una vez dentro del horno el mineral aditivado es sometido al proceso de reducción, el cual se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores para lo cual el horno dispone de 10 cámaras de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo, garantizándose perfil térmico y enriqueciendo la atmósfera reductora.

Para lograr los perfiles térmicos y gaseosos capaces de reaccionar con el mineral laterítico, obtener los extractables deseados, así como el ahorro de los portadores energéticos, se necesita estudiar, valorar y comprobar la influencia del petróleo en adición directa en los Hornos, teniendo en cuenta la crisis económica mundial, los altos precios actuales del petróleo y la necesidad estratégica de consolidar la economía.

Por lo que se plantea como **Problema:**



Insuficiente conocimiento de la influencia técnico-económica del petróleo aditivo inyectado directamente a los Hornos de Reducción de la empresa “ Cmdte Ernesto Che Guevara”.

Por lo que el **objeto de estudio** es: los Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Y el **Campo de acción:** el Proceso de Reducción del mineral laterítico, con el uso del petróleo aditivo como reductor.

Por lo que el **Objetivo general** es determinar teóricamente la influencia del petróleo aditivo inyectado directamente a los sinfines de los Hornos de Reducción de la empresa “ Cmdte Ernesto Che Guevara” sobre los parámetros técnico-económicos.

Los **Objetivos específicos:**

- Valorar la influencia de la disponibilidad de cámaras.
- Evaluar en función del extractable.
- Determinar el ahorro de petróleo.
- Determinar la influencia económica.

Por lo que se plantea como **Hipótesis:**

La inyección del petróleo aditivo directamente en los Hornos de Reducción de la empresa “Ernesto Che Guevara”, permitirá determinar el comportamiento de los parámetros técnico-económicos.

Tareas a realizar:

- Antecedentes de la utilización del petróleo aditivo en la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”.
- Análisis de la influencia de la disponibilidad de cámaras.



- Análisis de la influencia sobre el extractable.
- Valoración económica.
- Impacto ambiental de la planta.

Significación Teórico-Práctico:

- Se eliminan las pérdidas de petróleo en el circuito correa caliente y HR-1.
- Se disminuye el consumo de energía eléctrica.
- Se disminuye el costo de mantenimiento de las bandas transportadoras y la instrumentación del sistema de pesaje.
- Incremento de la productividad y eficiencia de las bombas de suministro de mineral.

Metodología de la investigación empleada:

Se empleó una metodología de investigación exploratoria que permite estudiar la influencia del petróleo aditivo inyectado directamente en los Hornos de Reducción de la empresa “ Cmdte Ernesto Che Guevara” revisando la bibliografía existente.

Se utilizó material investigativo existente en la base de datos de la empresa “ Cmdte Ernesto Che Guevara”, procedente del CEDINIQ, Moa, consultas a investigadores de gran prestigio que han trabajado con el petróleo aditivo y con tecnólogos de la planta. Luego mediante los métodos lógico y analítico, se comprueba dicha influencia, a partir de la disponibilidad de cámaras, comportamiento del extractable así como el ahorro de petróleo.



CAPÍTULO 1.

MARCO TEÓRICO

CONCEPTUAL



CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO CONCEPTUAL

La eficiencia en la etapa de reducción del proceso CARON, basado en el esquema de Lixiviación Carbonato- Amoniacal del mineral reducido que admite la mezcla de minerales lateríticos y serpentiniticos procedentes de la mina de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara” de Moa, ha constituido una prioridad, pues al obtenerse valores altos de esta, hay una mejora en todo el proceso de forma integral pues se garantiza una mayor extracción del níquel y el cobalto.

Debido a problemas operativos en la Planta de Gas a partir del carbón antracita, así como el alto costo económico de este, se decide cambiar a petróleo aditivo, para obtener gases reductores en los Hornos de Reducción. La implementación del petróleo aditivo contempla dos etapas, una en el punto de adición actual en el circuito, correa caliente en Secaderos -Hornos de Reducción y una segunda etapa, que sería aditivar el petróleo al mineral en el sinfín alimentador de los hornos de reducción.

En este capítulo, se brinda una panorámica de la utilización del petróleo aditivo, antecedentes, características del proceso de reducción de los hornos, así como el Marco Teórico en que se basa dicho trabajo, exponiendo las ventajas y deficiencias de las distintas etapas que ha transitado la implementación de este.

1.1. Antecedentes de la utilización del petróleo aditivo

Los hornos de reducción de la empresa “ Cmdte Ernesto Che Guevara”, fueron diseñados inicialmente para utilizar el gas obtenido en la planta de gasificación de petróleo, la cual constaba con tres reactores. Por problemas operativos en la misma, se decidió retomar el esquema de la planta de gas a partir del carbón antracita de



Nicaró, dicho proceso era complejo ya que requería de 5 a 6 operarios y de 5 a 6 mecánicos para su mantenimiento, bajo condiciones de alta peligrosidad y seguridad, aparte del alto costo económico del carbón antracita.

El extractable en la reducción con gas era inferior a 70 %, las cámaras de combustión eran soviéticas, las cuales requerían de un mantenimiento muy complejo, por lo que la disponibilidad de estas era muy baja.

Alepuz, H. (1992), desarrolló un trabajo donde plantea, que descomponer el petróleo dentro del proceso resultaba menos costoso, demostrando que era más factible adicionar este en correa caliente, que mantener la Planta de Gas. En dicho trabajo no se comenta sobre la influencia del petróleo sobre los parámetros técnicos-económicos.

La unión de todos estos factores determinaron la introducción paulatina del petróleo aditivo, lo cual coincidió con la modernización del nudo de combustión, al instalarse cámaras nuevas "PRIOR" de procedencia australiana, más modernas que las soviéticas y de más fácil mantenimiento, que permitieron aumentar la disponibilidad de cámaras por encima de un 80 %, lográndose una disminución del volumen de gas a partir del carbón antracita, supliendo a este con petróleo en correa caliente.

En la tabla 1 se puede observar el aumento gradual del extractable con la utilización de los distintos agentes reductores.

Tabla 1. Comportamiento del extractable obtenido con diferentes reductores.

Tipo de reductores	Reducción con Petróleo Combustionado	Reducción con Carbón Antracita	Reducción con Petróleo Aditivo
Extracción	Menor 60 %	70 – 78 %	80 – 82 %

La implementación del punto de adición actual comprendió dos etapas:



-1^{ra} Etapa: Ubicar el punto de adición lo más alejado del horno, para garantizar una buena homogenización del mineral con el petróleo antes de la reducción, lo cual garantiza altos valores de eficiencia y rendimiento en el proceso, al obtenerse extractables altos (+75 %), evitar altos consumos de reductores y una mejor calidad en el mineral reducido.

Desde la casa bombas de petróleo, se bombea el mismo hasta las correas calientes de secaderos, a través de un sistema de control automático se regula la adición de petróleo de acuerdo a la cantidad de mineral que se transporta. Se adiciona entre un 3,5 % y 4 % de la masa total de mineral que pasa por la banda transportadora. El mineral sale seco de los secaderos, cae en los transportadores TR-11 y TR-11A (rechazo), de ahí esa masa seca se traslada a los transportadores TR-12 y TR-12A, donde se le adiciona el petróleo, ahí comienza el mezclado, logrando el mayor porcentaje de homogenización en las cuatros unidades de molienda, de forma neumática se almacenan en los silos de la planta de hornos de reducción y de ahí hacia las tolvas, de donde se alimentan cada una de las unidades de reducción, ver Anexos (figura 1).

En la planta " Cmdte René Ramos Latour" de Nicaro, numerosas dificultades tecnológicas presentadas en la transportación del mineral mezclado, desde secaderos y hasta los hornos, propiciaron la búsqueda de una tecnología basada en adicionar el petróleo mediante lanzas de forma automática al interior de los hornos, a los hogares H1 y H7; lo cual constituyó una solución efectiva en ese momento.

Ya en el año 2007 un equipo de la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara" encabezado por el ingeniero Ladislao Campos, aprovechando el sistema automatizado de adición de petróleo de las propias lanzas, prolongaron las líneas hasta el sinfín alimentador de los hornos, con el objetivo de mezclar el petróleo con el mineral en ese punto, para elevar la eficiencia de extracción de níquel y cobalto; ya que la atmósfera gaseosa en los hornos presentaba serias dificultades al utilizar las lanzas, pues las boquillas de estas se tupían impidiendo una alta atomización y



mezcla del mineral, dicha tecnología aumentó la eficiencia del proceso, así como el ahorro de petróleo.

Basado en esa experiencia positiva, se decide implementar la adición directa de petróleo en los sinfines de los Hornos de Reducción de la empresa "Ernesto Che Guevara" en una segunda etapa.

Dicho sistema constará de una línea abastecedora de petróleo desde la instalación suministradora (objeto 152), hasta la parte superior de los hornos de reducción. El mineral seco y molido procedente de los silos; se pesa en las romanas situadas en la parte superior de los hornos, alimenta a los sinfines, el cual mediante un sistema automático de regulación del petróleo, que de acuerdo a la carga de mineral, dosificará la cantidad de éste a utilizar que es: 25 kg de petróleo por tonelada de mineral, eso para un horno en buen estado técnico, ver Anexos (figura 2).

La propuesta, basado en la experiencia probada en la Planta de Hornos de la empresa "Cmdte René Ramos Latour", necesita de los siguientes equipos:

- Bomba para petróleo aditivo.
- Transportador de sinfín y sistema de transmisión.
- Calentadores de tubo y coraza.
- Balanza dosificadora con control automático del petróleo.
- Tolva intermedia de pesaje.
- Línea de alimentación de petróleo DN 80 mm y DN 15 mm.
- Línea de vapor DN 20 mm.
- Sistema de instrumentación y control que incluye: flujómetros, válvulas auto operadas.



El punto de adición se prevé situarlo debajo de la tolva de alimentación por las siguientes razones:

- Mejor control de la dosificación del petróleo aditivo.
- Optimización del uso del combustible porque baja el consumo con respecto al 4 % utilizado en el sistema actual.
- Elimina los defectos negativos que tiene el empleo de petróleo aditivo en los molinos como son embotamientos, alto consumo energético (2^{do} consumidor de energía eléctrica de la empresa), baja productividad, etc.

El sinfín que se utilizará para garantizar el mezclado posee un largo de 3 m, con una inclinación de 5° para lograr una retención efectiva del mineral, y un sello de mineral que impide que los gases del horno penetren en el sistema de pesaje.

1.1.1. Dosificación del petróleo aditivo

Alepuz, H. (1993), en un estudio sobre el petróleo aditivo el valor del petróleo se fija en 2,5 % de la masa de mineral. No se hace alusión de su influencia en los parámetros técnicos- económicos de los hornos de reducción.

La utilización del petróleo aditivo resultó ser más ventajoso, pues la formación de gases reductores se efectúa dentro de la masa del mineral, donde tiene lugar el proceso físico del craqueo, el cual permite la formación del carbón activado con radicales libres, los cuales se enlazan con el oxígeno de los óxidos metálicos; surtiendo un efecto directo al liberar H₂ y CO, que actúan como reductores, aumentando la concentración de estos, mejorando el contacto gas-sólido.

1.2. Características del mineral alimentado a los Hornos de Reducción

En la tabla 2 se relaciona la composición química promedio del mineral seco y molido, enviado por la planta de secaderos a los hornos de reducción, donde se mezcla la limonita y la serpentina en una relación (3:1).



Tabla 2. Composición química del mineral de alimentación.

Ni	1,10 a 1,20 %
Fe	38 - 43 %
SiO ₂	<15 %
MgO	<10 %
Co	0.103 %

En la tabla 3 se observa la prevalencia de las partículas del mineral (1 malla -200 mesh) de un 85 a 87 %, ya que este grado de fineza, proporciona una mayor superficie del mineral, favoreciendo el contacto gas- sólido.

Tabla 3. Composición granulométrica.

1Malla +200 mesh	**
1Malla -200 mesh	85 – 87 %
Humedad	4,5 % (máx).

El mineral reducido tiene la siguiente composición:

Ni entre 1,20 y 1,30 %

Fe entre 44 y 48 %

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



1.3. Proceso de Reducción en los Hornos de la Planta “Ernesto Che Guevara”

El proceso de reducción está 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 bastante complejo, 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 se han 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.

Miranda L.J (s.a.) en su trabajo titulado “Identificación de las transformaciones químicas-mineralógicas de la mena laterítica y la serpentínica a través del proceso de calcinación reductora en la tecnología CARON”, plantea que el proceso carbonato amoniacal tiene como mayor defecto, el relacionado con la falta de correspondencia entre los regímenes de temperatura de la reducción que aporta el perfil gaseoso, y los que presentan o requieren los minerales serpentínicos y limoníticos. No se menciona el petróleo aditivo como agente reductor ni la influencia de este sobre los parámetro técnicos-económicos.

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: $\text{Fe}_2\text{O}_3\text{3H}_2\text{O}$



◆ Cromita: FeOCrO_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 alta fineza, lo cual ayuda positivamente al proceso al proporcionar una mayor superficie activa del mineral.

La reducción de la Limonita ocurre en los hogares superiores del horno (H-4 hasta H-6) zona donde existen altas concentraciones de agentes reductores y la temperatura del mineral está por encima de los 500 °C.

Un mineral que tenga la siguiente composición es considerado limonítico: Si = 10 % y Mg = 4 %.

Las extracciones de níquel a partir del mineral limonítico son mayores que las que pueden ser obtenidas con las serpentinas, con reducción hasta un 90 %.

Sin embargo en el mineral serpentínico la reducción no pasa de un 75 %, el calentamiento con 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 de 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. Como bien describe en su trabajo Castelton S .J (1972), si en este momento la concentración de reductores no es suficiente, los óxidos componentes se reagrupan nuevamente formando silicatos, esta vez deshidratados, que requieren condiciones más severas de temperaturas que no son posibles de efectuar para su reducción. Un mineral que tenga la siguiente composición es considerado serpentínico:

Fe = 38 %; Si = 10 % y Mg = 4 %.



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

- Gentita: $2\text{NiO} \cdot 2\text{MgO} \cdot 3\text{SiO}_2 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$
- Garnierita: $(\text{Ni Mg}) \text{OSiO}_2 \cdot \text{H}_2\text{O}$
- Nepoutita: $3(\text{NiMg}) \text{O}_2\text{SiO}_2 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$

Mientras mayor es el contenido de Silicio y Magnesio es más serpentínico.

La capacidad calorífica del Silicio y Magnesio es más alta que la del Niquel, por lo que se requiere aumentar la temperatura del horno, pues estos elementos tienden a enfriarlo. Con todo y eso no se logra una reducción efectiva por lo que los extractables se caen.

La reducción de la Serpentina ocurre en los hogares inferiores del horno.

En la planta se procede a aumentar la dosis de petróleo aditivo para que el proceso físico del craqueo sea más efectivo; se eleva la temperatura en los hogares inferiores y en las cámaras se baja, lo cual permite que la combustión se más incompleta, aumentando el contenido de los gases reductores.

La mezcla de ambos minerales (Limoníticos y Serpentiníticos) da una buena extracción, por lo que en la práctica se trabaja con una relación de 3:1 (3 partes de limonita por una de serpentina) obteniéndose extractables por encima del 80 %.

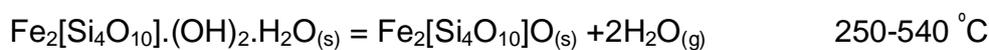
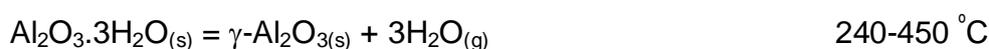
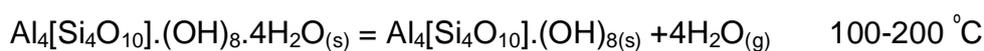
1.3.1. Principales transformaciones físico-químicas que ocurren en el horno

El Horno de Reducción como reactor químico se divide en tres zonas fundamentales, la de calentamiento, la de transición y la de reducción. Seguidamente se da un pequeño bosquejo de las principales transformaciones que sufre la mena alimentada.

La zona de calentamiento está comprendida entre los hogares del 0 al 6, donde se alcanzan temperaturas de mineral en el rango de 95 a 590 °C. En esta primera zona ocurre el debilitamiento de la estructura cristalina de algunos de los compuestos o



minerales que conforman la mena, teniendo lugar las reacciones de descomposición de la Nontronita, Halloysita, Gibbsita y Goethita, simultáneamente se evapora el agua física de forma gradual; además puede ocurrir la reducción parcial adelantada de la magnetita y los óxidos de níquel y cobalto. A continuación se muestran las principales reacciones que tienen lugar, así como el rango de temperatura aproximado de ocurrencia según lo planteado por Chang (1999):

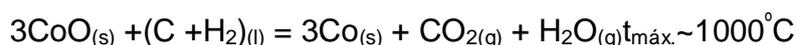
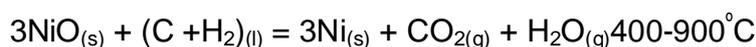
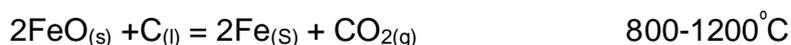
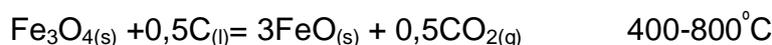
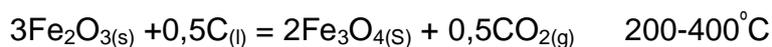


Para el sistema gas-petróleo aditivo, la temperatura de los gases en régimen de operación normal oscila, entre los 690 y 800 °C en los hogares 4 y 6. A esta temperatura puede ocurrir el craqueo del petróleo aditivo y la inflamación del petróleo, facilita una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno, como productos de interés para el proceso en cuestión. Por tanto, a partir de estos hogares será probable la ocurrencia de las reacciones siguientes:



En el sistema sólido-petróleo no catalítico aislado es posible la ocurrencia de la reducción de los óxidos de hierro, níquel y cobalto, ayudando al incremento de la productividad y eficiencia:

Las reacciones de reducción con petróleo aditivo en condiciones teóricas de reducción son las siguientes:



El agente reductor gaseoso se garantiza con el petróleo aditivo craqueado en la superficie del sólido, se difunde al interior de la partícula según el modelo cinético centro sin reaccionar.

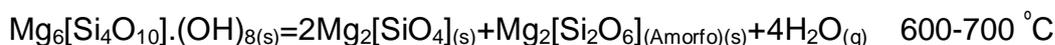
En la zona de transición puede efectuarse la reducción parcial más la disociación de compuestos, la misma está comprendida desde el hogar 7 al hogar 9 y se manejan temperaturas de mineral en el rango de 600 a 625°C⁰. En esta segunda zona comienzan a disociarse los compuestos cuyos productos son amorfos, además ocurre la reacción del petróleo aditivo unido a los productos de la combustión en las cámaras, con la probabilidad elevada de ocurrencia de las reacciones de reducción análogas a las de la primera zona, pero en un grado de transformación mayor. A continuación se muestran las reacciones de disociación que ocurren:



La zona de reducción está comprendida desde el hogar 10 al 15 con temperaturas del mineral en el orden de 660 a 760°C. En esta tercera zona tiene lugar la disociación de la Lizardita o serpentina, la que pierde el agua de constitución estructural junto a la de los compuestos disociados de la misma como es el caso de la Forsterita, y la Enstatita, la cual compite con la reducción del óxido de níquel. Además de llevarse a cabo la reacción del 60 % de carbono en el petróleo aditivo y



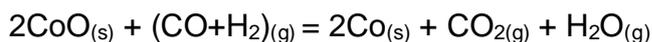
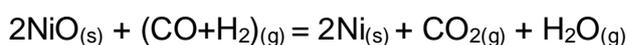
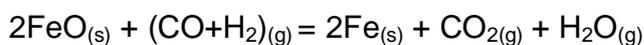
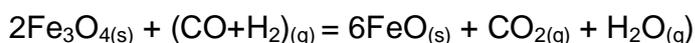
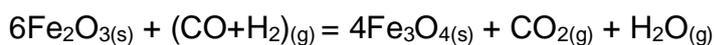
tecnológico, concluyendo de este modo la reducción de los óxidos de hierro, níquel y cobalto. A continuación se muestran las principales reacciones que ocurren:



En esta fase culmina la disociación e interacción de:



Las reacciones de reducción de los óxidos de hierro, níquel y cobalto son:



1.4. Parámetros que influyen en el proceso de reducción

En el proceso de reducción actúan varios parámetros que tienen gran influencia sobre la eficiencia metalúrgica. A continuación se describen algunos de ellos.

Influencia de la temperatura

La temperatura facilita la eliminación del agua libre, la descomposición térmica de las estructuras cristalinas y el desarrollo de las reacciones de reducción. Con la misma se mejora la cinética del proceso de reducción.



El perfil térmico actual que se utiliza se trata que esté en correspondencia con las características del mineral, específicamente con los componentes químicos totales de níquel, cobalto, hierro, silicio y magnesio, que están en correspondencia con las características del mineral alimentado al proceso, es decir, la relación limonita/serpentina. Por lo que es necesario un incremento gradual de la temperatura de arriba hacia abajo, para evitar una descomposición brusca de los minerales, y con esto reducir las pérdidas de níquel (Chang, 1999). (En este trabajo no hay referencias sobre el petróleo aditivo y su influencia en el sistema de adición directa sobre los parámetros técnicos económicos de los hornos.

Concentración de agentes reductores

Los gases utilizados en el proceso de reducción son obtenidos mediante la combustión incompleta del petróleo tecnológico en las cámaras del horno, y con el uso de petróleo aditivo, el que se mezcla con el mineral luego de ser secado. El contacto gas-mineral tiene lugar en las camas de mineral y, mayoritariamente, en la caída de un hogar a otro donde se verifica, aproximadamente, el 60 % de las reacciones de reducción.

El perfil gaseoso, para un porcentaje fijo y predeterminado de petróleo aditivo, se controla con la variación de los flujos de aire y petróleo, y así mantener constante la relación aire-petróleo en cámara ($\alpha = 62 - 64 \%$). Una buena concentración del gas reductor también cataliza la velocidad de las reacciones.

Granulometría

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



Tiempo de retención

Este parámetro depende principalmente de la cantidad de hogares y en correspondencia con la velocidad del eje central, que depende a su vez de la posición de los dientes en los brazos que remueven y trasladan el mineral en los hogares desde H-0 hasta H-16. La actual operación se realiza de forma tal que este parámetro se mantenga en el orden aproximadamente en los 90 minutos. En los momentos actuales, como está concebido el propio horno "Tipo- Herreshoff", muchos especialistas coinciden en que es un parámetro de poca influencia tanto en la metalización de los componentes valiosos de níquel y cobalto, como para la metalización del hierro.

Presión

La presión en el interior del horno debe ser superior a la atmosférica para evitar la entrada de aire desde el exterior que pueda provocar la reoxidación del níquel, cobalto y hierro metalizado. La información de la presión en el horno se obtiene con una frecuencia de segundos, generalmente, estas se encuentran en el orden de:

Hogar Superior H-0 → 10 mm H₂O.

Hogar Inferior H-16 → 2 mm H₂O

Cuando por deficiencias del proceso se obtienen valores de presión fuera de los rangos normados, puede el sello de seguridad del horno dispararse y los gases salen directamente a la atmósfera, en caso contrario significa que existe demasiada entrada de aire al horno, esto provoca una oxidación o reoxidación del mineral inicialmente descompuesto y reducido.

1.5. Características y parámetros más importantes de los Hornos de Reducción de la empresa " Cmdte Ernesto Che Guevara "

Los hogares múltiples son tipo cama de cromo-alúmina, consta de un eje central articulado con cuatros brazos en cada hogar (68 en total), que tienen entre 9 y 11



dientes encargados de remover trasladar el mineral de un hogar a otro mediante la rotación del eje aumentando el contacto gas-sólido, este movimiento es en zig-zag, el mineral desciende en los hogares pares por la periferia y en los impares por el centro. La falta de brazos y dientes, incide en el proceso de reducción; el petróleo tiende a calcinarse formando un núcleo, que va a formar una piedra, la cual tiende a tupidar la descarga de los hornos y no permiten al níquel reducirse, para contrarrestar esto, se baja el petróleo y la productividad del horno.

Consta de un eje central, el cual se puede virar por varias causas: la entrada de agua, la llama del quemador, etc. el proceso de reducción no se favorece, ya que el eje virado dificulta el movimiento en zig-zag de los gases en el interior del horno. Los gases suben en forma recta y el mineral cae por el centro del horno por lo que no completan el tiempo de residencia que debe tener para su reducción.

Las cámaras de combustión fueron inicialmente soviéticas. A partir de 1992 se sustituyen por otras de tecnología australiana "PRIOR", de fácil automatización, más durables, las cuales disminuyen el consumo de petróleo y causan menor deposición de escorias, crincker, etc..

Su distribución es la siguiente:

- ◆ 2 cámaras en H6 norte y sur.
- ◆ 2 cámaras en H8 norte y sur.
- ◆ 2 cámaras en H10 norte y sur.
- ◆ 2 cámaras en H12 norte y sur.
- ◆ 1 cámara en H14.
- ◆ 1 cámara en H15.

Si en H14 está en norte, en H15 está en sur y viceversa.



El horno opera con una presión ligera positiva: En H0 (10 a 12 mm de mercurio) y en H16 (2 a 3 mm de mercurio).

El petróleo aditivo introducido en las correas calientes de secaderos, proporciona los reductores necesarios para que tenga lugar el proceso de reducción.

El mineral reducido se descarga por el hogar 16 hacia un tambor rotatorio (enfriador del mineral) introducido en agua para bajar la temperatura del mineral hasta 250 °C, hasta estar apto para el próximo proceso.

La productividad y la eficiencia de los hornos dependen del estado técnico de los mismos. En la tabla 4 se ofrece los indicadores y sus rangos, significando que para un horno que opera con 10 cámaras de combustión la alimentación debe ser entre 20 a 22 toneladas con un consumo de petróleo aditivo de 25 kg/t, con un mineral con la composición química promedio relacionada más abajo.

Tabla 4. Datos generales de los hornos de reducción de la planta “Ernesto Che Guevara”.

Productividad del Horno, t/h	20 a 22
Tiempo de retención, min	1,50
Consumo de petróleo en combustión, kg/t	54-56
Consumo de petróleo aditivo, kg/t	25-28
Número de cámaras de combustión	10
Ley del mineral alimentado	
Fe	Desde 33 hasta 45 %
Ni	Desde 1,10 hasta 1,45 %
SiO ₂	Desde 8 hasta 12 %
MgO	Desde 4 hasta 7 %
Co	0,103 %



Conclusiones parciales del capítulo I

- La información bibliográfica precedente, relacionada con el proceso de reducción que ocurre en los hornos, y el uso del petróleo aditivo como agente reductor, permitió establecer los fundamentos necesarios para la comprensión del proceso en la empresa "Cmdte Ernesto Che Guevara", y del sistema de adición actual de petróleo en correas calientes, y así poder proponer una nueva forma de añadir el mismo en los sinfines de los hornos de reducción, para evaluar su influencia en los parámetros técnico-económicos.



CAPÍTULO 2.

MATERIALES Y

MÉTODOS



CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

Obtener conocimientos generales sobre el sistema de adición de petróleo en los sinfines de los hornos de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”, es de gran importancia ya que contribuyen a la selección de parámetros adecuados y toma de decisiones en la solución de problemas asociados con la eficiencia del proceso de reducción. Este trabajo encaminado a exponer las ventajas del sistema de adición directa respecto al sistema actual en cuanto a la disponibilidad de cámaras, el extractable y el ahorro de petróleo necesita de métodos, materiales y procedimientos adecuados, para establecerlos y así determinar la influencia del mismo.

2.1. Procedimiento utilizado

Disponibilidad de cámaras

Partiendo de que el petróleo aditivo aporta el 70 % de reductores y las cámaras el 30 % se escogió el horno 1 de la Losa 1 y el horno 4 de la misma Losa para determinar la influencia del petróleo en el punto de adición actual y el de adición directa en cuanto a la disponibilidad de cámaras.

En la tabla 5 se relacionan las condiciones técnicas del horno 1 y del horno 4 de la losa 1 el día 1ro de Mayo del 2012. El horno 1 con una productividad muy elevada a pesar de que está operando con 5 cámaras, tiene una disponibilidad de cámaras baja (50 %), un porcentaje elevado del consumo de petróleo aditivo, el resto de las condiciones técnicas están bien. El horno 4 con una productividad baja, ya que está operando con 10 cámaras para una disponibilidad del 100 % con buenas condiciones técnicas, y un índice del consumo de petróleo aditivo requerido.



Tabla 5. Condiciones técnicas de los hornos 1 y 4.

Hornos	Cámaras en Operación	Brazos y Dientes	Alimentación, t/h	Petróleo Aditivo, kg/h
1	5	Completos	16,41	36,4
4	10	Completos	17,33	25,03

A continuación se observa en la tabla 6 el comportamiento del perfil térmico en los hornos 1 y 4 en los distintos hogares, donde el horno 1 tiene un buen comportamiento del perfil térmico al igual que el 4, dentro de los parámetros requeridos para cada hogar.

Tabla 6. Perfiles térmicos de los hornos 1 y 4.

Hornos	Temperatura en los hogares									
	HO	H2	H4	H6	H7	H11	H12	H13	H14	H15
1	306	546	650	689	761	706	546	649	689	760
4	318	726	778	NT	749	NT	NT	718	726	778

En el horno 1 de las 5 cámaras que tiene en operación en el norte, la 6N está fuera de operación, por la parte sur, solo la cámara 10S está operando, el resto (6S, 8S, 12S, 15S) están fuera.

Como observamos en la tabla 7, se realizó el análisis a hornos con 7, 8 y 9 cámaras disponibles, no así para hornos con 6 cámaras, ya que en el mes de mayo, durante el muestreo no existía ningún horno operando con esta cantidad. El horno 12 con una disponibilidad del 70% y una productividad baja con el petróleo aditivo requerido, el horno 14 con una disponibilidad en 80%, baja productividad y un alto



consumo de petróleo aditivo, el horno 21 con una disponibilidad en 90 %, buena productividad y petróleo aditivo requerido.

Tabla 7. Condiciones técnicas generales de los hornos 12, 14 y 21.

Fecha	Horno	Cámaras en operación	Dientes y brazos	Alimentación	Petróleo aditivo,%
11/5/2012	12	7	Incompletos	16,75	27,01
21/5/2012	14	8	Incompletos	16,63	32,15
31/5/2012	21	9	Completos	21,04	23.79

En la tabla 8 se relacionan los perfiles térmicos de los hornos 12, 14 y 21. El perfil del horno 12 en el hogar H4 observamos un valor fuera de norma, por regulación en el flujo de aire en dicho hogar, por emanaciones de gases al ambiente. El perfil del horno 14 dentro de los requerimientos de norma. El perfil del horno 21 se encuentra dentro de la norma.

Tabla 8. Perfiles térmicos de los hornos 12, 14 y 21.

Horno	Hogares									
	H0	H2	H4	H6	H7	H11	H12	H13	H14	H15
12	351	696	399	759	NT	651	NT	696	715	759
14	395	715	719	750	NT	695	NT	715	719	750
21	314	676	670	778	NT	714	NT	676	670	768

El horno 12 con 3 cámaras fuera (8N, 8S y 12S), el horno 14 con 2 cámaras fuera de operación (12S y 8N) y el horno 21 con 1 cámara fuera (6S).



2.2. Procedimiento para el análisis del comportamiento del extractable

A partir de los parámetros de entrada y salida en las tres losas de los hornos de reducción, se tomaron datos aleatorios en distintas fechas: 1, 2, 3, 11, 12 y 13 de Mayo y se analizaron en cuanto a: composición química del mineral de entrada (ley de níquel, contenido de hierro y cantidad de petróleo aditivo), mineral de salida (reducción del níquel, del cobalto, contracción del hierro y el extractable de níquel y cobalto).

2.2.1. Procedimiento para tomar las muestras en el mineral de alimentación a la entrada de los hornos (HR-1)

El análisis y muestreo del mineral alimentado a los hornos se realizó a la entrada de los mismos por losas, constituyendo una muestra compósito (representativa), luego pasó a ser una muestra central, ya que se analizó en el laboratorio central de la fábrica, dando como resultado el contenido de níquel, hierro, cobalto, silicio y magnesio que se alimentan.

Utensilios a utilizar:

Toma muestra continuo: Aparato formado por un sinfín encamisado accionado por un motor reductor.

Recipiente toma muestra: Recipiente cilíndrico de acero níquel provisto de tapa que se coloca a la descarga del sinfín del toma muestra de contener: 12 a 15 kg.

Gaveta rectangular de acero níquel que se coloca en la descarga de la cuarteadora.

Recipiente: Recipiente hermético con tapa capaz de contener 250 g de material muestreado.

Cuarteadora. Caja metálica provista de ranuras que descarga por gravedad el material vertido sobre ella en dos sentidos, permitiendo la división de la muestra en dos partes. Se usará una cuarteadora de 12 ranuras.



Método para la toma de la muestra

Coloque el recipiente de acero níquel en la descarga del sinfín del toma muestra y tápelo bien. Retire el recipiente con la muestra al transcurrir 6 horas de trabajo (medio turno de trabajo) y coloque otro en su lugar. Ponga una gaveta en cada una de las descargas de la cuarteadora. Vierta el contenido del recipiente cilíndrico por la superficie de la cuarteadora desechando una de las partes hasta reducir la muestra a 1 kg, tome aproximadamente 50g. Envase la cantidad anterior en un frasco plástico bien identificado y envíela al Laboratorio Químico Central.

2.2.2. Procedimiento para tomar las muestras en el mineral reducido a la salida de los hornos (HR-4)

Determinamos la cantidad de níquel, cobalto y hierro que se reducen, en la descarga del horno para definir el comportamiento del extractable y así establecer comparaciones entre los dos sistemas de adición.

Utensilios utilizados:

- Balanza de brazo colgante, de 90 kg
- Recipiente de 1 L de capacidad.
- Frascos plásticos con tapas capaces de contener 500 mL de material muestreado.
- Sifón
- Turboaerador. Aparato cuya función es someter la muestra a aireación y agitación.
- Vara metálica de 4 m, en una punta aditivo para poner un frasco plástico o de cristal con tapa de goma.
- Cántara de acero níquel o aluminio de 14 L de capacidad.



Método para la toma de la muestra

Para tomar los incrementos o tomas elementales se procedió como sigue:

Se destapó el sello del tanque de contacto que estaba en operación.

Inmediatamente se introdujo la vara con el frasco tapado por el sello hasta la altura de 4 m aproximadamente, se destapó tirando de la cuerda que sostiene el tapón y se llenó de pulpa de mineral.

Se retiró el frasco y se tapó el sello, las operaciones se repitieron.

Preparación de la muestra

Se pesó la cántara vacía con la tapa (P1).

En la cántara se echó 4 litros de licor fresco con una concentración de 82 g/L de NH₃, con una tolerancia de ± 2 g/L.

Se echó en la cántara las muestras de 500 ml que se tomaron en la mañana y la tarde.

Se instaló la cántara en el turboaerador y se agitó la muestra durante 15 minutos.

Después se dejó la cántara en reposo durante 1 hora y 30 minutos.

Se extrajo el líquido contenido en la cántara con el sifón (cuidando que no cambie el color del líquido para no perder sólidos).

Seguidamente se pesó la cántara (P2), y por diferencia de peso con el peso inicial de la cántara se obtuvo ($P3 = P2 - P1$), esta diferencia indica la cantidad de sólidos totales (en kg) tomados en 4 horas. Luego de tenerse P3, se adicionó la cantidad de licor fresco con la misma concentración (82 g/L).

Como el peso de la muestra no excedió de 1,5 kg, se añadió a la cántara la cantidad necesaria de solución amoniacal (11 L). Luego se instaló en el turboaerador por dos



horas. Se abrió el aire de 18 a 20 burbujas/minuto ó 2,5 L/minuto, y luego se arrancó el turboaerador.

Se tomó 1 L de pulpa, con el sifón dentro de la cántara a una altura del fondo de 50 mm, se envasó en un pomo, identificó bien y luego se envió al Laboratorio Químico Central.

Esta muestra se toma a la salida de los enfriadores, se lixivia con amoníaco para determinar el extractable en el horno:

$$\text{Extractable} = 1 - \left[\frac{\text{Fe}_{\text{HR1}}}{\text{Fe}_{\text{HR4}}} \cdot \frac{\text{Ni}_{\text{HR4}}}{\text{Ni}_{\text{HR1}}} \right] 100.$$

2.2.3. Método de análisis químico

El método de análisis químico empleado para determinar la composición química del mineral alimentado, y reducido y lixiviado es por espectrofotometría de absorción atómica. Se lleva a cabo en un espectrofotómetro de absorción atómica modelo UNICAM 929 (figura 1), y el principio de su funcionamiento, se basa en la absorción de la luz, por los átomos libres del elemento (Níquel- Cobalto), a una longitud de onda específica para ese elemento.

Longitud de onda: Níquel-----232 nm, Cobalto----- 240,7 nm.



Figura 1. Espectrofotómetro de absorción atómica. Modelo UNICAM 929.

2.2.4. Valoración volumétrica para el Fe

Se pipetea 25 ml de la muestra en un erlenmeyer de 250 ml.

Se le añaden 10 ml de ácido clorhídrico 1:1

Se coloca en la plancha hasta que alcance el punto de ebullición y se reduce de Fe^{3+} a Fe^{2+} con cloruro estannoso.

Se enfría y se procede a añadir SPEAKER, se esperan de 4 a 5 minutos y se le añade cloruro de mercurio.

Se esperan 3 minutos y se procede a la valoración con $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ (dicromato de potasio) utilizando como indicador difenil amino sulfonato de sodio:

Ejemplo: Si se gastan 40 ml de dicromato de potasio eso corresponde a un 40 % de hierro.



2.3. Características del petróleo utilizado

En la tabla 9 se refleja las características principales del petróleo utilizado entre el 1ro y el 31 de Mayo. Del 1 al 21 de Mayo se aditivó petróleo con las características relacionadas en la tabla 10. A partir del día 22 de Mayo, se aditivó con otro tipo de petróleo.

Tabla 9. Características del petróleo.

Fecha	Viscosidad en cs		H ₂ O, %	A.P.I.	Densidad, g/cm ³	Cont. Azufre, %	Consumo específico de petróleo, kg/t	
	50 °C	100 °C					Cámaras	Aditivo
1-may	349,8	37,8	1,0	15,7	0,9613	2,16	54,86	33,33
11-may	384,4	39,2	1,0	15,6	0,9620	2,14	55,22	26,90
21-may	337,4	37,1	1,0	15,7	0,9665	2,14	51,54	29,57
31-may	311,7 2	68,7	1,0	14,7	0,9674	2,09	54,88	30,38

2.4. Análisis y procedimiento para la contabilidad metalúrgica entre la muestra SM 8 y HR 1

A las muestras de la mezcla (mineral más petróleo) a la salida de los secaderos (SM 8) y a la entrada de los hornos de reducción (HR 1) del mes de Mayo del 2012, para calcular las pérdidas de petróleo en el sistema de adición actual y lo que se ahorraría en el sistema de adición directa se le realizó el siguiente procedimiento.

- Se contabiliza la cantidad de petróleo aditivado en Secaderos (SM 8).



- A la muestra HR 1 se le hace un análisis del contenido de Carbono en la muestra aditivada, el cual llevamos a toneladas, para determinar la cantidad de petróleo que llega a la entrada de los hornos.
- Se contabiliza la cantidad de mineral seco neto que entra a los hornos.

Mineral Seco Neto = Mineral alimentado (descarga de los hornos de secaderos) + Reciclo del mineral de Secaderos (- humedad 4 %) + Reciclo del mineral de hornos (- humedad).

2.4.1. Método para determinar el contenido de carbono en el mineral

Los análisis de carbono en el mineral reducido se determinaron por el analizador simultáneo de azufre y carbón (figura 2). El equipo asimila muestras en forma de polvo o virutas metálicas, con un rango de análisis de carbono de 0 a 6 %.



Figura 2. Electro analizador de azufre y carbono

Este método se fundamenta en la combustión de la muestra en presencia de oxígeno, el cual emplea un acelerador en un horno de alta frecuencia, el combustible al reaccionar da lugar a la formación de dióxido de carbono (CO_2) y dióxido de azufre (SO_2), lo que permite determinar cuantitativamente los componentes a través del analizador infrarrojo, en correspondencia con el peso de la muestra y los factores de calibración.



Reactivos y materiales:

- ◆ Oxígeno (pureza 99,5)
- ◆ Tungsteno granulado .Tamaño de partículas (12 a 20 mesh).
- ◆ Virutas de Fe.
- ◆ Asearita.
- ◆ Perclorato de magnesio granulado.
- ◆ Lana de cuarzo (espesor de 4 a 12 micras).
- ◆ Crisoles de cerámica para hornos de alta frecuencia.

El contenido de C se emite por el equipo automáticamente expresándose en %.

Conclusiones parciales

- Las muestras de mineral alimentado y el reducido y lixiviado de los hornos de reducción seleccionadas para su caracterización, se consideran representativas con respecto a su volumen total.
- En este capítulo mediante métodos y análisis químicos, técnicas de muestreo, y estimaciones estadísticas, basadas en los parámetros de operación, del mineral de entrada y el mineral reducido, se hizo una valoración en los siguientes indicadores:
 - ◆ Disponibilidad de cámaras.
 - ◆ Extractable de Ni + Co.
 - ◆ Ahorro de portadores energéticos.

Los cuales permiten evaluar la influencia del sistema de adición directa y compararlo con el sistema de adición actual.



CAPÍTULO 3.

ANÁLISIS DE LOS

RESULTADOS



CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS

A partir de los datos obtenidos en la planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comdte Ernesto Che Guevara” en este capítulo se evalúan los resultados de los cálculos, estimaciones y comparaciones realizadas que no van a permitir determinar la influencia positiva del Sistema de adición directa de petróleo a los hornos, respecto al Sistema de adición actual, la valoración económica y el impacto medioambiental.

3.1. Análisis de los resultados

3.1.1. Influencia de la disponibilidad de cámaras

En la tabla 10 se muestra el contenido de metales alimentado a los hornos evaluados, y el respectivo índice de consumo de petróleo por tonelada de mineral neto seco alimentado, el cual depende en gran medida de la relación limonita-serpentina (4:1).

Tabla 10. Característica del mineral alimentado y el índice de consumo específico de petróleo.

Composición química					Consumo específico de petróleo, kg/t	
Ni	Co	Fe	Si	Mg	Cámara	Aditivo
1,068	0,092	40,09	10,19	4,279	53,01	36,4



En la tabla 11 se observa que del 100 % de reductores, el petróleo aditivo aporta el 70 % y las cámaras el 30 % (A pesar de consumir más petróleo, ellas no solo aportan reductores, su función como tal es garantizar el perfil térmico del horno).

Tabla 11. Porcentaje de reductores.

Horno	Cámaras	Reductores que aportan, %	
		Cámaras	Petróleo aditivo
1	5	15	70
4	10	30	70

Como se observa en el horno 1, el petróleo aditivo esta obligado a suplir el porcentaje de reductores que no garantizan las cámaras de combustión, por lo que hay que aumentar la cantidad de petróleo aditivo para enriquecer la atmósfera reductora y a la vez proporcionar el perfil térmico requerido.

El sistema de adicción actual no permite realizar esta operación, pues la alimentación del mineral aditivado es la misma para todos los hornos, independientemente de las características técnicas y la disponibilidad de cámaras que tengan, por lo que obliga a aumentar la cantidad de petróleo en los hogares inferiores para garantizar el perfil térmico y a su vez se baja la temperatura en las cámaras para lograr una combustión más incompleta y con esto un porcentaje mayor de reductores, esa solución no es efectiva pues no garantiza el 30 % de reductores necesarios, pero además la combustión incompleta genera mayor cantidad de carbono, lo cual implica más hollín, crincker, que en su conjunto tienden a tupid el horno. En el horno 4 no pasa lo mismo, pues presenta buenas condiciones técnicas y un 100 % de disponibilidad de cámaras.

Se ha estimado basado en la experiencia que se tiene en la planta de reducción, que un horno con buenas condiciones técnicas tiene las productividades (en t/h) que se muestran en la tabla 12, de acuerdo a la disponibilidad de cámaras y un porcentaje de petróleo aditivo prefijado en 2,5 por cada tonelada de mineral.



Tabla 12. Productividades de los hornos en función de la disponibilidad de cámaras.

Petróleo aditivo, %	Productividad, t/h	Disponibilidad de cámaras
2,5	22,0	10
2,5	19,8	9
2,5	17,6	8
2,5	15,4	7
2,5	13,2	6
2,5	11,0	5

Índice de consumo de petróleo aditivo en el horno 1 =33,15 kg/t.

Para que el horno 1 pueda tener una productividad y eficiencia buena requiere del siguiente índice del petróleo aditivo:

$36,4 \text{ kg/t} \cdot 0,15 = 5,46 \text{ kg/t}$ Donde 0,15 es el 15 % de reductores que no aportan las cámaras y 5,46 kg/t es el incremento en el índice de consumo de petróleo.

$36,4 \text{ kg/t} + 5,46 \text{ kg/t} = 41.86 \text{ kg/t}$ es decir necesita aumentar el petróleo aditivo a esa cantidad.

En el sistema de adicción directa, para hornos como el numero 1, con baja disponibilidad de cámaras (5), la ventaja radica, en que mediante un sistema de regulación automática dosificaría 25 kg de petróleo por tonelada de mineral, más 3,75 kg que es la cantidad requerida de petróleo, proporcionando mayor cantidad de gases reductores sin tener que bajar la temperatura en cámaras y esta seguiría proporcionando el perfil térmico.

Este procedimiento se realizó a otros hornos con diferente disponibilidad de cámaras.



En la tabla 13 se observa como el contenido de hierro y de los elementos nocivos se acentúan, denotando un material con tendencia hacia la serpentina lo que se corrobora con el incremento del índice de consumo específico en cámara para alcanzar un perfil de temperatura mas exigente.

Tabla 13. Característica del mineral alimentado Hornos 12, 14 y 21.

Horno	Fecha	Composición química, %					Consumo específico de petróleo, t/h	
		Ni	Co	Fe	Si	Mg	Cámara	Aditivo
12	11/5/2012	1,258	0,079	38,98	11,22	5,46	55,22	27,01
14	21/5/2012	1,068	0,085	37,205	10,192	3,63	56,54	32,15
21	31/5/2012	1,124	0,095	37,76	11,56	4,99	56,71	23,79

En la tabla 14 se recoge el aporte de reductores en cámara por horno, para el horno 12 con un 21% de reductores y un déficit del 9 % (0,09), el horno 14 con un 24% de reductores y un déficit de 6 % (0,06) y el horno 21 con 27% de reductores .

Tabla 14. Aporte de reductores (%).

Horno	Cantidad de Cámaras	Reductores de Cámaras, %	Reductores del Petróleo aditivo, %
12	7	21	70
14	8	24	70
21	9	27	70

En la figura 3 se observa el comportamiento del petróleo aditivo necesario para suplir el déficit de reductores que no aportan las cámaras, en ambos sistemas de adición de petróleo.

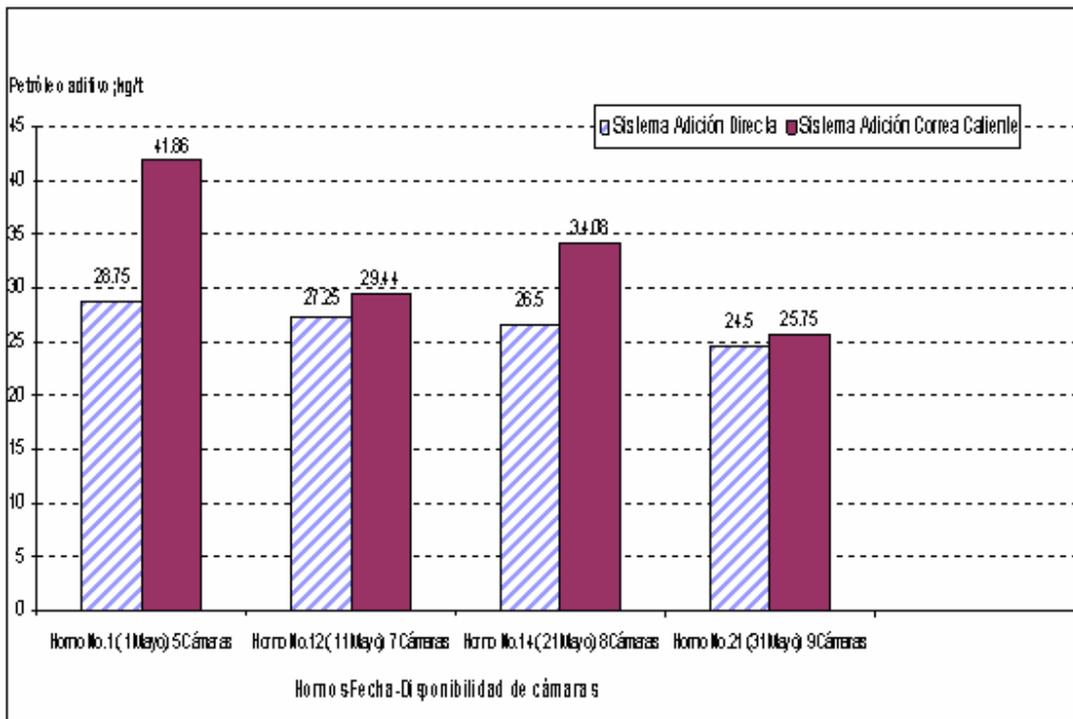


Figura 3. Comportamiento del petróleo aditivo en cuanto a disponibilidad de cámaras.

Se observa que los hornos 1; 12 y 14, en el sistema de adición actual, necesitan una cantidad de petróleo aditivo por encima del que realmente requieren, posibilidad que permite el sistema de adición directa. El valor en el horno 21 es menor en la adición actual que en la directa, debido a que la adición de petróleo en correa caliente se dosifica con un valor fijo para toda la alimentación a los hornos, independientemente de la disponibilidad de cámaras que tenga cada horno, recibiendo una cantidad de petróleo por debajo de la que realmente requiere (25,75 kg/t)

3.1.2. Comportamiento del extractable

En la tabla 15 se recoge el comportamiento del extractable de Ni y Co en las losas 1,2,3 , así como la cantidad de petróleo aditivo del día 1, 2 y 3 de Mayo.



Tabla 15. Extractable y petróleo aditivo en las losas ..

Fecha	Petróleo aditivo kg./t	Extractable de Ni, %	Extractable de Co, %
1/5/2012	33,33	77,57	47,86
2/5/2012	31,61	80,16	58,81
3/5/2012	29,04	84,19	62,71

En las tablas 16 se puede observar que para una ley de Ni baja (0,98 – 1,09 %), se le adiciona una dosis alta de petróleo (tabla 16), donde se obtiene el día primero de mayo un extractable de 77,57 %. El día dos de Mayo el mineral alimentado, al mantener las características químicas más o menos similares, se baja la dosis de petróleo aditivo obteniendo un extractable de 80,16 %. El día 3 de mayo ocurre lo mismo con una ley del mineral (1,09 %) para un extractable de 84,19 %.

Tabla 16. Mineral alimentado en la entrada de las losas.

Fecha	Ni	Fe	Co	Si	Mg
1/5/2012	0,98	37,8	0,090	10,50	4,56
2/5/2012	0,98	39,6	0,102	9,05	3,63
3/5/2012	1,09	39,3	0,095	9,95	4,21

Se observa que al acercar los valores del petróleo aditivo al valor fijado de adición de 25 kg/t (tabla 15) en condiciones técnicas estables: perfil térmico requerido, características químicas más o menos similares, buena reducción (entre 0,21 y 0,26 % de níquel), buena contracción del hierro (37,8/44,0 - 39,3/47,7), un valor de Si (9,05 – 10,5), (reflejado en la tabla 17), el extractable sube; lo mismo sucede para la losa 2 y 3.(tabla 15).



Tabla 17. Mineral reducido a la salida de los hornos.

Fecha	Ni	Fe	Co
1/5/2012	0,26	44,9	0,055
2/5/2012	0,22	44,3	0,097
3/5/2012	0,21	47,7	0,043

El día 11 el mineral mantiene características más o menos similares en las 3 losas, con una ley de níquel un poco más alta (1,06 – 1,11), cantidad de aditivo más o menos igual (29,28 – 34,78) y el extractable baja un poco, lo mismo sucede para las losas restantes.

El día 12 de mayo el extractable en la losa 1 (80,14 %) y la losa 3 (79,09 %) más o menos se mantienen, pero en la losa 2 cae bruscamente (71,09 %), debido a que el horno 12 de esa losa, presenta inestabilidad en el perfil térmico (tabla 18), solo opera hasta las 12 p.m., luego no lo hace más, demostrando que el perfil térmico influye también de manera muy significativa en el resultado del extractable.

Tabla 18. Perfil térmico del horno 12.

Hogares	H0	H2	H4	H6	H7	H11	H12	H13	H14	H15
Horno 12	359	324	293	322	329	N T	N T	324	293	352

Por lo que se puede concluir que el extractable no depende de la forma o del lugar en que se adicione el petróleo, ya que existe una serie de factores cuya combinación favorable deciden la eficiencia del proceso de reducción. A continuación se enumeran algunos de ellos:

- Características del mineral alimentado.
- Perfil térmico.
- Perfil gaseoso.



- Tiempo de residencia.
- Presión del horno (siempre positiva para evitar reoxidación).
- Granulometría o fineza del mineral.
- Contenido de carbono o petróleo en el mineral a la entrada de cada horno.

Lo que favorece al extractable, aplicar el sistema de adición de petróleo en los sinfines no se ha podido demostrar con total certeza, ya que está en dependencia de muchos factores (relacionados anteriormente), sin embargo, es un hecho que además de lo anterior se produce un ahorro energético considerable, por concepto de eliminar todas las pérdidas de petróleo de trayecto que hoy existen, como se explica a continuación en el punto 3.1.3, y el ahorro directo de energía eléctrica que implica moler mineral sin presencia del combustible en cuestión.

3.1.3. Influencia del sistema de adición directa en el ahorro de petróleo

En el punto de adición actual se determinó y valoró las pérdidas del importante portador energético, que se pierden en el circuito correas calientes – HR1. La causa fundamental de pérdidas está dada por las incrustaciones:

- Incrustaciones que quedan en el contacto con las bandas transportadoras.
- En las tolvas de los molinos.
- En los separadores de la Unidad de Molienda.
- En las líneas de transportes neumáticos.
- En las bolas de los molinos.
- En los Silos de mineral.
- En las tolvas de los hornos.



Pero además cuando la temperatura del mineral que se adiciona, está por encima del punto de inflamación del petróleo, los componentes ligeros de éste tienden a volatizarse durante la transportación, en el molino etc., perdiendo una masa de combustible que no interviene en el proceso, por lo que es necesario adicionar de un 3,6 a 4,2 % de petróleo, para lograr 2,5 kg por cada tonelada de mineral en la entrada a los hornos.

En el Sistema de adición directa se aprovechan esos componentes ligeros, los cuales intervienen activamente en el proceso del craqueo del petróleo, aportando energía adicional para el proceso.

3.1.4. Contabilidad metalúrgica de la mezcla entre SM-8 (Salida de Secaderos) y HR-1 (Entrada a los Hornos).

La tabla 19 recoge los valores necesarios para determinar las pérdidas de petróleo que se originan desde la tolva del producto final de secaderos a la entrada de los hornos de reducción en el mes de Mayo del 2012.

Tabla 19. Cantidad de mineral seco a hornos, de petróleo aditivo y carbono.

	SM-8	HR-1
Cantidad de petróleo aditivo, t	7373,96	-
Cantidad de mineral seco neto a hornos, t	-	256399,18
Carbono, %	-	2,28

Cantidad de carbono en el mineral seco neto a hornos (x_1).

256399,18 t ----- 100 %

X_1 ----- 2,28 %

$X_1 = 5845,9$ ton de carbono



Cantidad de petróleo aditivo que llega a hornos (X_2).

1 ton de petróleo----- 0,85 toneladas de carbono

X_2 ----- 5845,9 toneladas de carbono

$$X_2 = 6877,53 \text{ t}$$

Cálculo de la pérdida de petróleo desde la salida de secaderos hasta la entrada de los hornos en el mes de Mayo (X_3).

$$X_3 = 7373,96 - 6877,53$$

$$X_3 = 496,43 \text{ t}$$

Como se puede observar este resultado muestra la cantidad de petróleo que se pierden (incrustaciones, en los gases de salida etc.), que no son aprovechadas en el proceso. Estas pérdidas unidas a las que se originan desde la descarga de los hornos de secaderos a las bandas transportadoras 12 y 12A, que es donde comienza a aditivarse el mineral hasta la tolva del producto final, suman el total de petróleo que se pierde en el sistema de adición actual, deficiencia que se elimina al aplicar la propuesta de este trabajo.

3.1.5. Valoración económica

Aditivar el petróleo al mineral en el sinfín alimentador de los Hornos de Reducción de la empresa “Cmdte Ernesto Che Guevara”, eliminando el punto de adición actual y con ello todas las deficiencias que este genera en el sistema productivo, tiene un impacto económico en la misma.

En primer lugar es una experiencia probada en la Planta de Hornos de la empresa “Cmdte René Ramos Latour” desde el 2008 hasta la fecha, el cual ha permitido un mejor mezclado del petróleo con el mineral, no disminuyen las extracciones de níquel y cobalto, y si se logra un evidente ahorro de petróleo.



Con la implementación del sistema de adición directa en la planta de Hornos de Reducción, se eliminan las pérdidas de petróleo en el circuito correas calientes y HR-1 de 7000 a 8000 t/año. Se produce una disminución del consumo de energía eléctrica por el incremento de la productividad en los molinos hasta 11,9 t/h al moler mineral sin presencia de petróleo, una disminución del costo de mantenimiento por concepto de cambio de bandas en los transportadores 12 y 12A e instrumentación del sistema de pesaje, un incremento de la productividad y eficiencia de las bombas de suministro de mineral (TA-36) hacia los silos. Se valida la contabilidad metalúrgica de la muestra SM-8 y HR-1 respectivamente.

3.1.6. Impacto medio ambiental

El proceso pirometalúrgico que caracteriza a la planta de Hornos de Reducción, utilizando petróleo aditivo como agente reductor, genera emisiones de gases contaminantes como son: monóxido de carbono (CO), dinitrógeno (N₂), dióxido de carbono (CO₂), H₂O en forma de vapor, trazas de metano, etc., así como polvos minerales con partículas de níquel y otros metales en suspensión que salen a la atmósfera, a través de la chimenea que posee la planta producto de las reacciones químicas (combustión completa e incompleta) del petróleo dentro del mineral. Estas emanaciones por las características del proceso siempre van a tener lugar, la cuestión es como reducirlas.

En el sistema de adición directa al inyectarse el petróleo en la entrada del horno, de forma inicial, va a eliminar la emisión de los componentes ligero del petróleo en el circuito correa caliente- HR-1. El proceso de reducción al ser más eficiente, permite un mejor craqueo del petróleo, y tiende a disminuir la emisión de estos gases tóxicos, pero además en la post-combustión, los gases que no reaccionaron se quemarán en la parte superior del horno. De acuerdo a la eficiencia del proceso, así será la concentración del CO y H₂ en los gases de salida de los Hornos de reducción.



Otras fuentes contaminantes en la planta son:

- ◆ El derrame de mineral: producto de salideros en las romanas, en los alimentadores, sinfines de polvos, sellos de transportadores, etc..
- ◆ Emisión de polvo por las mirillas de las cámaras, sellos y puntos de transferencia del mineral.
- ◆ Residuos sólidos generados en la planta (material refractario, chatarra, papel de desecho).

En el sistema de adición directa, se prevé una disminución de las emisiones de polvo por concepto de una mejor distribución del tonelaje en los hornos. Se prevé ampliar el software para el control desde el panel de operación de los parámetros del proceso en puntos críticos, lazos de control automático, que permitan a un equipo de expertos de forma más individualizada (horno por horno), variar parámetros y flujos directamente en el panel o a través del operador.

Conclusiones parciales del capítulo

En este capítulo mediante análisis matemático y de estimaciones estadísticas, basados en la experiencia de operarios, tecnólogos e investigadores que han tratado el tema se hizo una valoración de los siguientes parámetros:

- Disponibilidad de cámaras.
 - Extractable de Ni + Co.
 - Ahorro de portadores energéticos.
- La disponibilidad de cámaras influye directamente en la productividad y eficiencia de los hornos de reducción, donde el sistema actual de adición de petróleo no logra resolver las deficiencias que generan, posibilidad que ofrece la adición directa, ya que permite regular la dosificación de petróleo en dependencia de la disponibilidad de cámaras.



- El sistema de adición directa no tiene una influencia significativa en la obtención del extractable, pues el mismo no depende de donde esté situado el punto de adición de petróleo.
- A través de una valoración económica se demuestra lo factible que resulta instalar el sistema de adición directa para el ahorro de petróleo.

La planta Horno de Reducción es alta contaminadora por la cantidad de residuos, chatarra, gases nocivos y polvos que emite al medio ambiente.



CONCLUSIONES



CONCLUSIONES

La adición directa de petróleo en el sinfín alimentador de cada horno puede influir positivamente en los parámetros técnico-económicos de la forma siguiente:

- Permitirá regular la dosificación de petróleo en la alimentación, en función de la cantidad de cámaras disponibles, de manera que garantice los reductores necesarios.
- Garantizará una alta eficiencia energética, ya que el petróleo dosificado se aprovecha completamente, según el tonelaje potencial de cada horno.
- Elimina las pérdidas de petróleo en el circuito Secaderos – Hornos de reducción.
- Mejora la contabilidad metalúrgica, al eliminar los errores o perturbaciones que se producen actualmente en los análisis químicos, introducidos por la presencia de petróleo en las muestras, para determinar el contenido de metales presentes en el mineral alimentado.

El sistema de adición directa no tiene influencia significativa en el extractable.



RECOMENDACIONES



RECOMENDACIONES

- ◆ Mantener la disponibilidad de cámaras de combustión por encima de 85 %, para garantizar un perfil térmico adecuado y un consumo de petróleo óptimo.
- ◆ Que se aplique de manera integral este sistema de adición, teniendo en cuenta la experiencia acumulada en la empresa “René Ramos Latour”.



BIBLIOGRAFÍA



BIBLIOGRAFÍA

1. Alepuz, H.. 1993: Mejoramiento de los índices técnicos-económicos del procesamiento del mineral en los hornos con tecnología PRIOR. Informe técnico del CEDINIQ.
2. Casteltom, S.J.. 1972: Reducción selectiva de la Serpentina. Primera edición.
3. Chang, A.. 1999:"Una visión sobre las reservas estratégicas de eficiencia metalúrgica en la tecnología carbonato–amoniaca". Revista Min. Geo., Vol. XVI, No 1: 76-82.
4. Chang, C. A. 1997: Interpretación de las zonas del horno de Reducción. Informe Técnico ISMM.
5. Manual de Operaciones de la Planta Hornos de Reducción. Grupo de Tecnología. ECG.
6. Miranda, L. J. (s.a.) Identificación de las transformaciones químicas-mineralógicas de la mena laterítica y serpentinitica a través del proceso de calcinación reductora en la tecnología CARON.
7. Miranda, L. J.. 1998: Transformaciones de las fases férricas en el proceso de calcinación reductoras.
8. N.E.I.B. 22-03-02 Mineral alimentado a los hornos. Muestra HR-1. Muestreo.
9. N.E.I.B: 22-03-04 Pulpa de mineral reducido. Muestra HR-4 (A-B-C) Muestreo.
10. N.E.I.B: 64-01-03 Determinación por espectrofotometría de absorción atómica de Ni y Co en el mineral reducido y lixiviado.



11. N.E.I.B: 64-01-04 Determinación simultánea de S y C en el equipo CS- MAT-600.
12. N.E.I.B: 64-01-07 Determinación por espectrofotometría por absorción atómica de Ni y Co en lateritas y serpentinitas.
13. N.E.I.B: 64-01-15 Determinación de Fe metálico y Fe bivalente en mineral laterítico reducido. Método volumétrico.
14. Proskuriakov, V.A. y Dabkin, A. E.. 1984: Química del Petróleo y el Gas. Editorial Mir. Reedición.
15. Rodríguez, V.. 1999: "Prueba de adición de petróleo al horno. Informe Técnico del CEINNIQ".



ANEXOS

ANEXOS

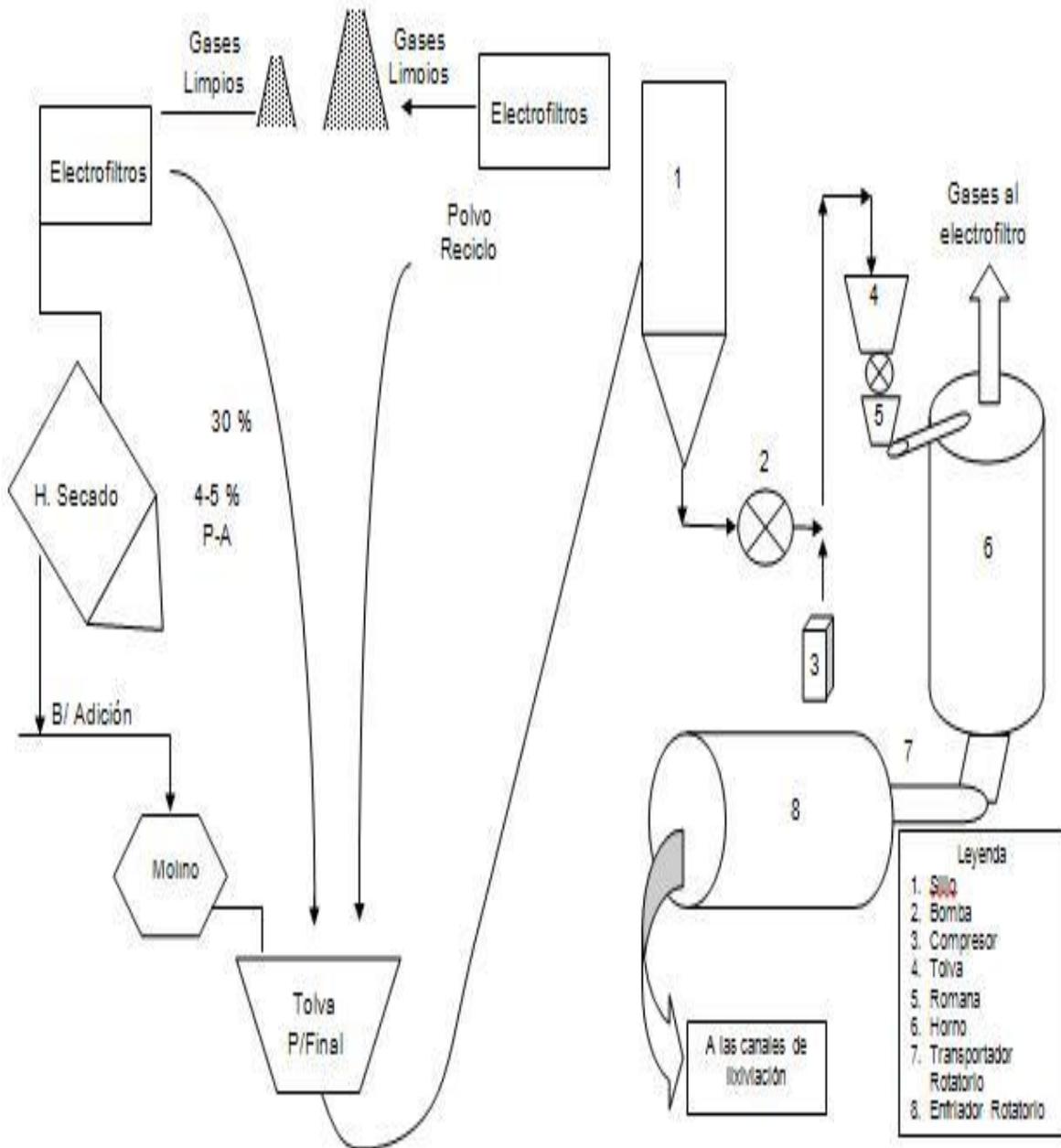


Figura 1. Sistema de adición de petróleo en correas calientes.



Propuesta de Adición Directa

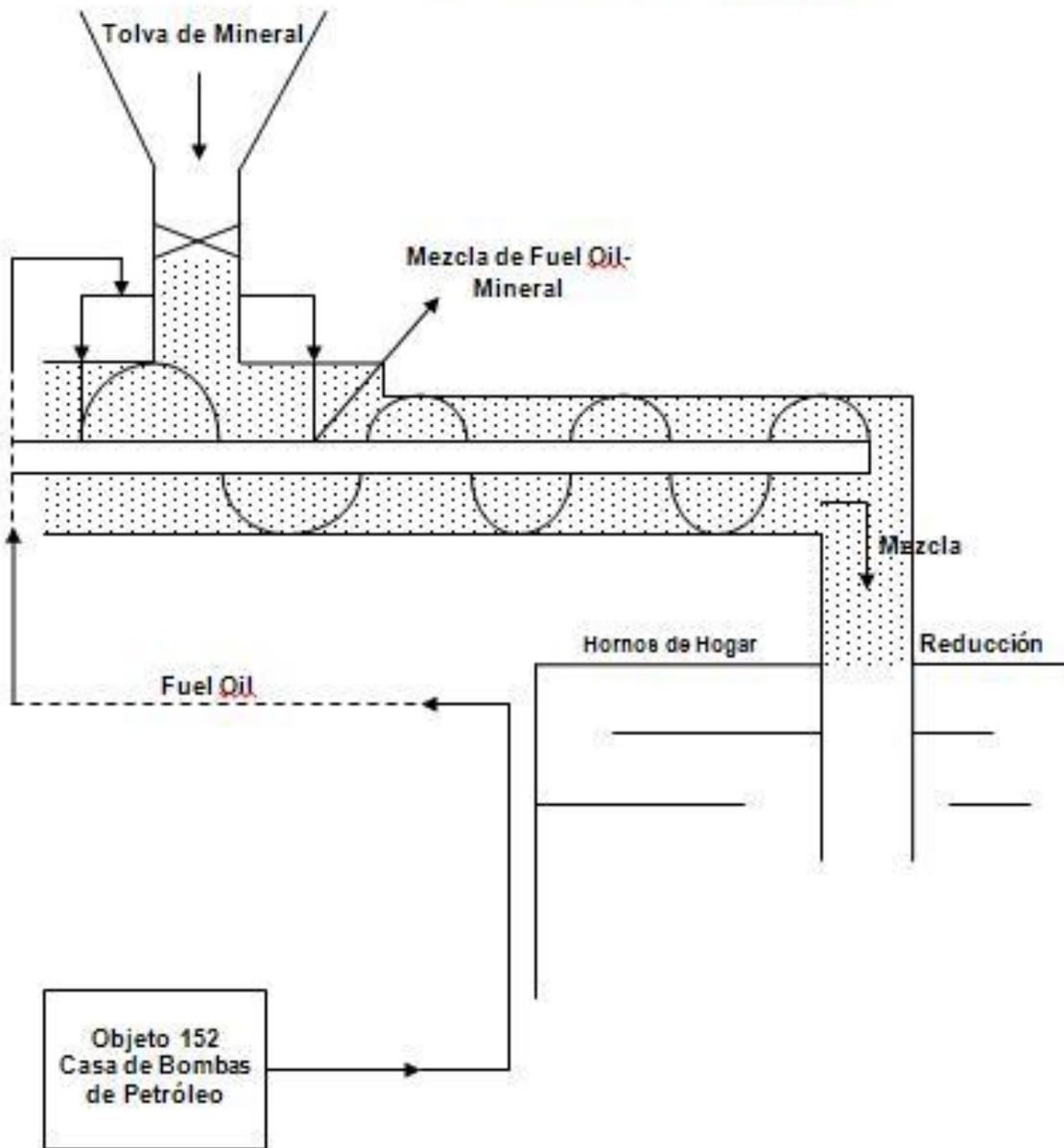


Figura 2. Sistema de adición directa de petróleo en los sinfines de los hornos de reducción.

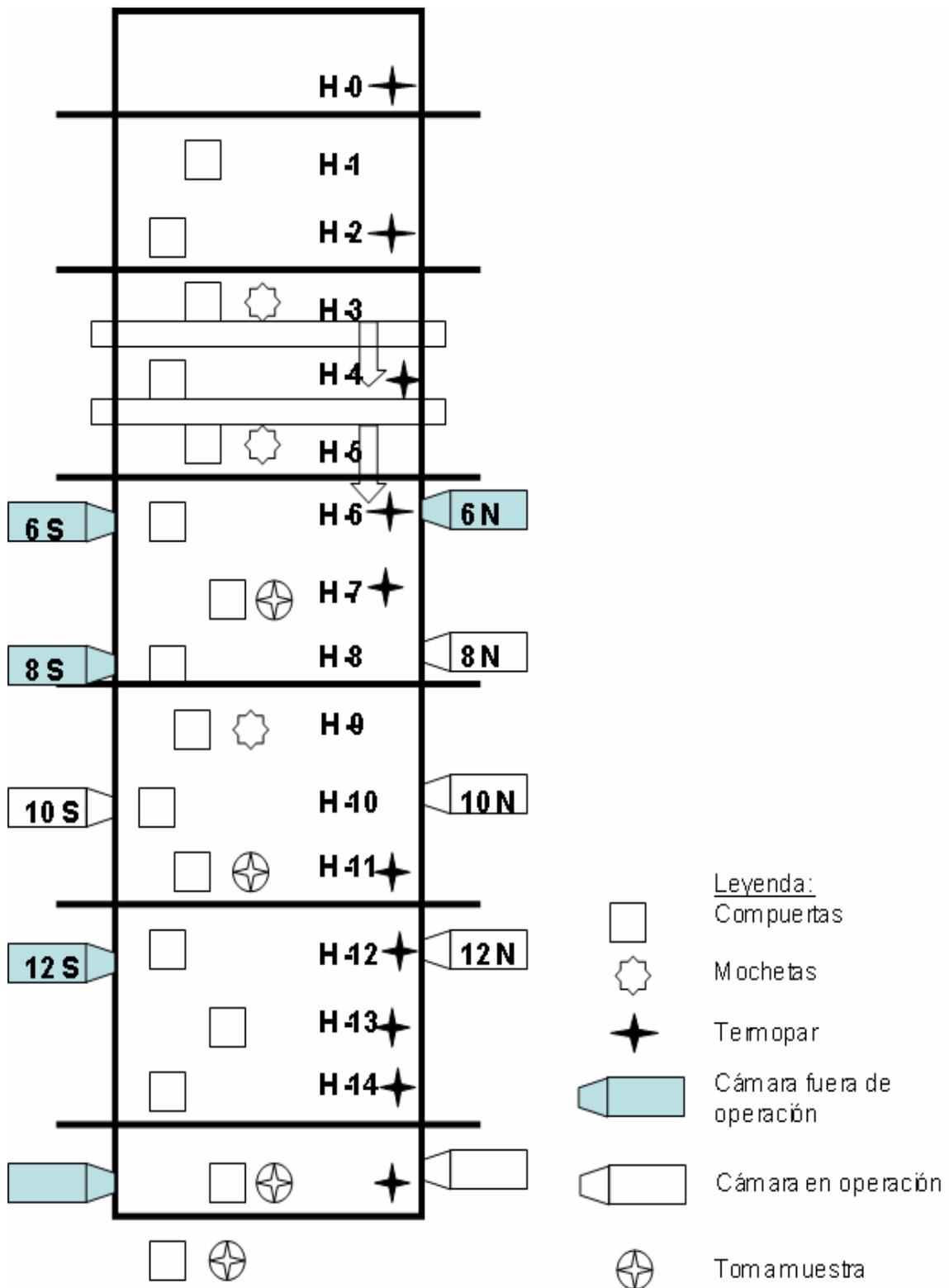


Figura 3. Esquema del horno 1. Disponibilidad de cámaras.