



**MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”  
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA  
DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DE  
FUEL-OIL POR FINOS DE CARBÓN  
ANTRACITA COMO ADITIVO EN LA  
EMPRESA “COMANDANTE ERNESTO  
CHE GUEVARA”**

**Trabajo de Diploma para optar el Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales**

**Leonardo Tittle Basulto**

**Moa, 2018  
“Año 60 de la Revolución”**



**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**

**“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”**

**FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA**

**DEPARTAMENTO DE METALURGIA Y QUÍMICA**

**EVALUACIÓN DE LA SUSTITUCIÓN DE  
FUEL-OIL POR FINOS DE CARBÓN  
ANTRACITA COMO ADITIVO EN LA  
EMPRESA “COMANDANTE ERNESTO  
CHE GUEVARA”**

**Trabajo de Diploma en opción al Título de Ingeniero en Metalurgia y Materiales**

**Autor: Leonardo Tittle Basulto**

**Tutor: Prof. Tít. Ing. Pedro Enrique Beyris Mazar, Dr.C**

**Moa, 2018**

**“Año 60 de la Revolución”**

**DECLARACIÓN DE AUTOR.**

Yo: Leonardo Tittle Basulto

Autor del presente trabajo, accedo a que el mismo sea propiedad del Instituto Superior Minero Metalúrgico “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, y de la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, los cuales podrán hacer uso del mismo con el fin que estimen conveniente.

Leonardo Tittle Basulto

---

Dr.C Pedro Enrique Beyris Mazar

---

Msc Crispín Sánchez Guillen

---

Ing José Rojas Rojas

---

## *Agradecimientos:*

*Primeramente le agradezco a Dios.*

*A mi madre Belkis, mi padrastro Reinaldo por educarme y convertirme en la persona que hoy soy; por su comprensión y apoyo incondicional.*

*A mi papá Leonardo y mi madrastra Katia por estar presentes en los momentos que más los he necesitado.*

*A mis tíos Enrique, Eddy, Samuel, Mislery, a mis hermanas Fanevis y Lilian por ayudarme y escucharme cada vez que los necesite.*

*A mi novia Mairelys, quien ha sido mi pareja, mi compañera, mi amiga en cualquier circunstancia de la vida y quien me ha dado tanto amor.*

*A Alexander y Adela por recibirme como parte de su familia y hacer mi estancia en la universidad más agradable.*

*A mis tutores el Dr.º Pedro Enrique Beyris Mazar, Ing. José Rojas Rojas y el Ms.º Prispín Sánchez Guillen por haberme ayudado en la realización de este trabajo.*

*A todos los profesores del departamento de Metalurgia-Química por su aporte en mi formación como futuro ingeniero.*

*A todos mis amigos y compañeros que en estos años formaron parte de las personas que me mostraron su apoyo y ayuda.*

*A todos ellos. Muchas gracias*

Las manos duelen más, pero se saca, con las  
manos fuertes, metal duro.

José Martí

## **RESUMEN**

El objetivo de la presente investigación se centra en evaluar la sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita, en la UBP Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, debido al alto consumo físico de fuel-oil como agente reductor en la obtención de níquel y cobalto, y la poca disponibilidad del mismo en el mercado internacional. Se realizó una comparación de la base de datos obtenida sobre el comportamiento del extractable de níquel y cobalto a escala de laboratorio e industrial. Para el análisis de la concentración de azufre y carbono en el fuel-oil y el carbón antracita se utilizó el analizador infrarrojo automático y para la determinación del extractable de níquel y cobalto en el mineral reducido se empleó el método de espectrofotometría de adsorción atómica. Se evaluó los porcentajes de extractable de níquel y cobalto cuando se utilizan diferentes contenidos de fuel-oil, carbón antracita y la mezcla de ambos como aditivos. Los resultados muestran que las mejores extracciones (86,7 % de Ni y 65,7 % de Co) se logran a escala de laboratorio sustituyendo el 20 % de fuel-oil por carbón antracita a la temperatura de 770 °C. Considerando el precio actual del carbón antracita se demostró que no es rentable la sustitución del fuel-oil por este agente reductor debido al alto precio (542,84 USD/t) que presenta en el mercado internacional.

### **Palabras claves**

Carbón antracita, extractable de Ni y Co, fuel-oil.

## **ABSTRACT**

The objective of the present investigation focuses on evaluating the substitution of fuel-oil by anthracite coal fines, in the UBP Furnaces of Reduction of the company "Comandante Ernesto Che Guevara", due to the high physical consumption of fuel-oil as reducing agent in the obtaining of nickel and cobalt, and the little availability of it in the international market. A comparison of the database obtained on the behavior of nickel and cobalt extractable at laboratory and industrial scale was made. For the analysis of the sulfur and carbon concentration in the fuel-oil and anthracite coal the automatic infrared analyzer was used and for the determination of the extractable nickel and cobalt in the reduced ore, the atomic adsorption spectrophotometry method was used. The percentages of extractable nickel and cobalt were evaluated when using different contents of fuel-oil, anthracite coal and the mixture of both as additives. The results show that the best extractions (86.7 % Ni and 65.7 % Co) are achieved on a laboratory scale, replacing 20% of fuel-oil with anthracite coal at a temperature of 770 °C. Considering the current price of anthracite coal, it was shown that the substitution of fuel-oil by this reducing agent is not profitable due to the high price (542.84 USD/t) it presents in the international market.

### **Keywords**

Anthracite coal, extractable Ni and Co, fuel-oil.

## CONTENIDO

INTRODUCCIÓN.....	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO.....	4
1.1 DESCRIPCIÓN DEL PROCESO TECNOLÓGICO DE LA UBP HORNOS DE REDUCCIÓN .....	4
1.2 ASPECTOS GENERALES DE LOS MATERIALES Y EQUIPOS PRESENTES .....	8
1.2.1 CARBÓN ANTRACITA .....	8
1.2.2 PETRÓLEO (FUEL-OIL).....	11
1.2.3 HORNOS DE SOLERAS MÚLTIPLES (HERRESHOFT) .....	14
1.3 INSTALACIÓN PARA ADICIONAR CARBÓN ANTRACITA COMO ADITIVO EN LA EMPRESA “COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA”.....	15
1.3.1 CARACTERÍSTICAS DEL CARBÓN ANTRACITA .....	16
1.3.2 ACCIONES A REALIZAR POR EL OPERADOR DE PETRÓLEO ADITIVO PARA AJUSTAR EL PORCIENTO DE FUEL-OIL A LOS TRANSPORTADORES TR-12 O TR-12A .....	16
1.4 SUSTITUCIÓN PARCIAL DEL FUEL OIL POR CARBÓN ANTRACITA.....	16
1.5 ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN .....	17
1.5.1 CARBÓN ANTRACITA COMO ADITIVO .....	17
1.5.2 PETRÓLEO COMO ADITIVO .....	18
1.5.3 OTROS ADITIVOS PARA LA REDUCCIÓN DEL MINERAL.....	21
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS .....	25
2.1 METODOLOGÍA PARA LA PREPARACIÓN DE LAS MUESTRAS .....	25
2.1.2 MUESTRA DE MINERAL.....	27
2.2 MUESTRA DE CARBÓN ANTRACITA.....	27
2.3 PUNTOS DE MUESTREO EN LA INDUSTRIA .....	28
2.4 PROCEDIMIENTO EMPLEADO PARA LA REALIZACIÓN DE LOS EXPERIMENTOS.....	28
2.4.1 CONDICIONES EXPERIMENTALES EN EL HORNO .....	29
2.4.2. DESCRIPCIÓN DE LOS EXPERIMENTOS QUE SE REALIZARON .....	30
2.5.1 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE REDUCCIÓN .....	35
2.5.2 RECIPIENTE PARA EL TRASLADO DE LAS MUESTRAS (KITASATO).....	36
2.5.3 DESCRIPCIÓN DE LA INSTALACIÓN DE LIXIVIACIÓN (QT Y QTC).....	37
2.5.4 BALANZA DIGITAL.....	39
2.5.5 PROBETAS PARA DETERMINAR LA VELOCIDAD DE SEDIMENTACIÓN ...	40
2.6 TÉCNICAS ANALÍTICAS UTILIZADAS .....	40
2.6.1 TÉCNICA DE ABSORCIÓN ATÓMICA.....	40
2.6.2 ANALIZADOR INFRARROJO AUTOMÁTICO .....	41

CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS .....	43
3.1 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS OBTENIDOS.....	44
3.2 EXPERIMENTOS REALIZADOS CON DIFERENTES PORCIENTOS DE CARBÓN ANTRACITA.....	46
3.3 EXTRACCIONES DE NÍQUEL Y COBALTO CUANDO SE UTILIZAN MEZCLAS DE CARBÓN Y FUEL-OIL .....	48
3.4 COMPORTAMIENTO DE LAS EXTRACCIONES DE NÍQUEL Y COBALTO EN EL MES DE MAYO DE 2018 .....	52
3.5 ESTIMACIÓN ECONÓMICA .....	56
3.6 VALORACIÓN ECOLÓGICA.....	59
CONCLUSIONES GENERALES .....	62
RECOMENDACIONES.....	63
BIBLIOGRAFÍA	
ANEXO	



## INTRODUCCIÓN

Para la producción de níquel y cobalto en Cuba, se utilizan dos tecnologías, la tecnología carbonato amoniacal en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" (ECG) y la lixiviación ácida a presión empresa Moa Nickel S.A. Pedro Sotto Alba.

La empresa Productora de níquel y cobalto "Comandante Ernesto Che Guevara" (ECG) cuenta con cinco Unidades Básicas de Producción.

- UBP Preparación de Mineral
- UBP Hornos de Reducción
- UBP Lixiviación y Lavado
- UBP Recuperación de Amoníaco y Cobalto
- UBP Calcinación y Sínter

En el procesamiento de los minerales lateríticos mediante la tecnología carbonato amoniacal, el níquel y cobalto se reducen antes de entrar en contacto con las soluciones carbonato amoniacales lixivadoras (Llanzana, Navarro, Pérez, 2009).

La reducción del mineral se realiza en la UBP Hornos de Reducción, donde se recibe el mineral que proviene de la Planta de Preparación de mineral. La planta tiene como principal tarea, la reducción de los metales, níquel y cobalto que se encuentran en los minerales. Este proceso se realiza en los hornos HERRESHOFF con gases reductores obtenidos de la combustión incompleta del petróleo. La planta cuenta con 24 hornos divididos en tres losas. La mezcla de minerales secados y molidos se transporta neumáticamente desde los silos hasta las tolvas de recepción de los hornos y luego se dosifica a los mismos a través de romanas. La mezcla de minerales reducidos se traslada en el transportador rotatorio a los enfriadores para un posterior tratamiento.

Para realizar la reducción química de las menas lateríticas se han estudiado diversos factores que influyen en este proceso, como son: características físico-químicas del mineral a procesar, tiempo de retención del mineral en el horno, temperatura, tamaño de partícula, concentración, flujo de gases reductores y compacidad del mineral, etc.



El uso de aditivos para la reducción del mineral es de gran importancia en la industria metalúrgica. Con la utilización de distintos tipos de portadores energéticos se puede lograr mayor reducción de mineral procesado y la obtención de un semiproducto con mayor índice de extractable.

En el diseño original de la tecnología, los gases para la reducción se obtenían de la planta de gas, mezclando monóxido de carbono e hidrógeno obtenido a partir de carbón antracita y vapor de agua. En la actualidad se utiliza fuel-oil mezclado con el mineral de alimentación para obtener la mayor parte de los reductores en el horno, el resto de los reductores se obtiene con la combustión incompleta del fuel-oil en las cámaras de combustión de los hornos (Alepuz, 2009).

La empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" para la reducción del níquel y el cobalto, emplea de 2,5 a 2,9 % de fuel-oil como aditivo, pero las limitaciones de este portador energético ha llevado a que se realice un estudio para la posible utilización de otras fuentes de energía como el petcoke, carbón antracita y bituminoso para la sustitución parcial o total del fuel-oil.

La existencia de toneladas de carbón antracita en los depósitos de rechazo del puerto de Moa y Cayo Guam, provocan daños ambientales importantes; como una solución para este problema, la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" propuso como una alternativa, sustituir el fuel-oil por carbón antracita o lograr una relación carbón-petróleo y así contribuir a disminuir el consumo físico de este último, generando un ahorro significativo a la economía del país, siempre que se logre mantener la eficiencia metalúrgica de la planta y de la fábrica en general.

La poca disponibilidad de fuel-oil por la caída de la producción de petróleo, en búsqueda de los productores de incrementar los precios, y la acumulación de un rechazo fino de carbón antracita, ha hecho que se valore la utilización de este como agente reductor; siendo una alternativa para la sustitución parcial del fuel-oil (Guillen, 2016 b).

Según lo expuesto anteriormente se plantea como:

**Situación problemática:** El alto consumo de fuel-oil empleado como agente reductor en la planta de Hornos de Reducción para reducir el mineral y la poca disponibilidad del mismo en el mercado internacional.



**Problema Científico:** Insuficiente conocimiento sobre la influencia de la sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita como agente reductor en la planta de Hornos de Reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

**Objeto de estudio:** Carbón antracita.

**Campo de acción:** Transformaciones que ocurren en el proceso de reducción de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", utilizando carbón antracita como agente reductor.

**Objetivo General:** Evaluar la sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita como agente reductor en la UBP Hornos de Reducción.

**Hipótesis:** Si se evalúa el comportamiento de la sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita como agente reductor en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", a escala de laboratorio e industrial, se podrá evaluar la eficiencia de la planta.

**Objetivos específicos:**

- Evaluar el porcentaje que se debe utilizar de carbón antracita, para la sustitución por fuel-oil como agente reductor.
- Evaluar el comportamiento de las extracciones de níquel y cobalto, con la utilización de fuel-oil, carbón antracita y de la mezcla de ambos como aditivo.
- Analizar la base de datos que se obtuvo a escala de laboratorio e industrial.

**Tareas de la investigación**

- Búsqueda y análisis de bibliografías relacionadas con la investigación.
- Análisis de la base de datos obtenida por investigaciones precedentes en la que se sustituyó el petróleo aditivo por carbón antracita a escala de laboratorio e industrial.
- Evaluación cualitativa y cuantitativa de los resultados obtenidos y su estimación económica.



## **CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO**

En el presente capítulo, con el propósito de adquirir la información y las tendencias actuales para la realización de esta investigación, se exponen: las características generales del carbón antracita, haciendo énfasis en los estudios relacionados a la implementación de este aditivo en la reducción de minerales lateríticos. También se abordará sobre la instalación destinada a la adición de este agente reductor.

Los objetivos del presente capítulo son:

- Exponer los aspectos generales del carbón antracita y su uso como aditivo en la reducción de minerales lateríticos.
- Realizar un análisis de los estudios precedentes sobre la adición de carbón antracita y otros aditivos.

### **1.1 Descripción del proceso tecnológico de la UBP Hornos de Reducción**

El objetivo del proceso que se realiza en esta planta es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para ello la misma cuenta con 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores como equipos fundamentales.

La mezcla de minerales antes de ser sometido a proceso de reducción se somete a un proceso de secado y molienda en la planta de Preparación de Mineral. En esta planta a los minerales se le elimina la humedad hasta un 5 % aproximadamente y se muele hasta una fineza de 0,074 mm de (85 a 87) % de la masa de minerales. También en los transportadores de banda se alimenta alrededor de 2,9 % de petróleo tecnológico, por lo que se logra una homogeneización bastante completa con la desventaja de una pérdida de combustible en el trayecto hasta su alimentación (Productora de níquel y cobalto (ECG), 2007).

La mezcla de minerales, después de pasar por la sección de molienda, es enviada mediante transporte neumático a los silos (225 – SI 1...6) cuya función, además de homogeneizar los minerales es la de almacenarlo. Estos equipos tienen una capacidad de 1 500 toneladas cada uno, aunque pueden alcanzar hasta 1 900 toneladas, lo que facilita una operación en los hornos de alrededor de 16 horas. En



la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 (225- BO 113...121) con una capacidad de 120 t/h, mediante las cuales la mezcla de minerales es bombeada hasta las tolvas de los hornos (225- TV 1...12), dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas tienen una capacidad de 400 toneladas aproximadamente y permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.

Una vez la mezcla de minerales en las tolvas, esta pasa a los dosificadores de pesaje automático (225-BA-201 1...24) que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno de acuerdo a la productividad fijada, estos equipos tienen una capacidad hasta 22 t/h. Después que la mezcla de minerales es pesada, se produce la descarga de la misma al sinfín alimentador (225- TR- 202 1...24), el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar 0.

La mezcla de minerales una vez dentro del horno es sometida al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores ( $\text{CO}+\text{H}_2$ ), para ello el horno dispone de 10 cámaras de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo, el cual permite además de lograr el perfil de temperatura, enriquecer la atmósfera reductora.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples tipo ПМ 17 K- 6,8, de 23,5 metros de alto y 6,8 metros de diámetro, con 17 hogares ó soleras. Además, el horno (225- HR- 205 1...24) cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos dientes o paletas con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de la mezcla de minerales de un hogar a otro (Productora de níquel y cobalto (ECG), 2007).

El movimiento o traslado de la mezcla de minerales dentro del horno se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro.

Los gases que salen del horno succionados por un extractor (225- VE22 1... 24) arrastran consigo partículas muy finas de minerales, las cuales se hacen necesario recuperar para evitar mayores pérdidas en el proceso, para ello, la planta cuenta con un sistema de limpieza de gases formado por un grupo de 6 ciclones en cada



horno, 12 electrofiltros (223-EF 1...12) y un electrofiltro en la sección de los silos para la purificación del aire del transporte neumático y del aire de succión de las tolvas.

Los minerales recuperados en la batería de ciclones (223 –CN 10...33), caen por gravedad al horno a través del hogar 0. Los minerales que se recuperan en los electrofiltros son transportados por unos transportadores de paleta hacia una tolva, debajo de la cual se encuentran unas bombas neumáticas (223- BO 103/104 y 107/108) con capacidad de 40 t/h. Estas bombas envían los minerales hacia las tolvas de producto final de la sección de molienda de la UBP Planta de Preparación de Mineral para más tarde ser bombeado hacia los silos, formando así el ciclo de hornos.

El proceso de reducción es eminentemente endotérmico. Por este motivo el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares 15, 12, 10, 8 y 6 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases para el calentamiento de la mezcla de minerales, a la vez que enriquece la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta.

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es de 14 kPa, facilitado por el uso de ventiladores centrífugos (225- VE216 1...9), capaces de mantener una operación estable en dicha área. Cada bloque cuenta con tres de ellos, dos en operación y uno de reserva.

Así, tenemos que la mezcla de minerales en su descenso es sometida a un perfil ascendente de temperatura que permite un calentamiento gradual, a la vez que penetra en un perfil gaseoso que garantiza un aumento en la concentración de reductores. La atmósfera reductora es controlada mediante la relación  $CO_2 / CO$  en el Hogar 10 que debe ser de 0,9 a 1,2, y se muestra a continuación en la tabla 1.

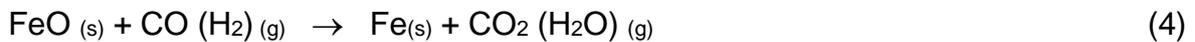
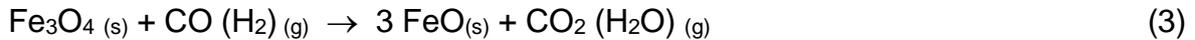
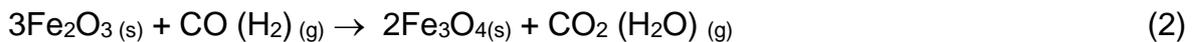
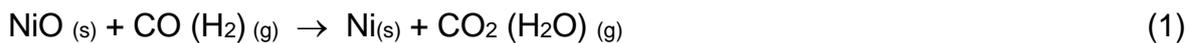


**Tabla 1** Un perfil típico de temperatura en el horno

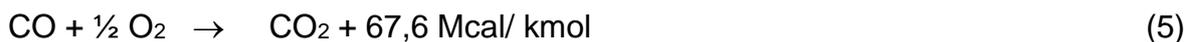
Hogar:	T Gas:	T. Minerales:
H0	350 °C	100 °C
H4	740 °C	350 °C
H6	690 °C	410 °C
H7	695 °C	440 °C
H9	710 °C	500 °C
H11	720 °C	580 °C
H13	740 °C	650 °C
H15	760 °C	730 °C

**Fuente:** (Productora de níquel y cobalto (ECG), 2007)

En estas condiciones, es posible el desarrollo de las reacciones de reducción a pesar del corto tiempo de retención del mineral en el horno (45 minutos).



Esta operación se complementa con la introducción de aire en los hogares 4 y 6 (2000 m<sup>3</sup>/h) para la postcombustión, por medio de un ventilador (225 –VE23 1...24), de los gases con un cierto contenido de CO y H<sub>2</sub> no consumidos en la reacción química, para evitar un incremento de las concentraciones de los mismos en el sistema de limpieza de gases (precipitador electrostático) al mismo tiempo se aprovecha el calor de reacción exotérmica liberado en la combustión para facilitar el perfil de temperatura ideal en el horno.





Después de reducido el óxido de níquel y los óxidos superiores de hierro a níquel metálico y hierro metálico según las reacciones anteriores (1,2,3,4), la mezcla de minerales es descargada del horno al transportador rotatorio (225 – TR- 207 1...12), a su vez, este entrega el mineral a una temperatura de 690 a 730 °C al enfriador ( 225- EN – 208 1...12), el cual tiene el objetivo de enfriar el mineral hasta una temperatura por debajo de los 260 °C. El interior de los enfriadores está formado por unas paletas y los carros raspadores, los cuales se encargan de remover la mezcla de minerales y raspar la superficie interior del enfriador evitando así que los minerales se incrusten e interfieran en el proceso de transferencia o intercambio de calor. El enfriador rota sobre la piscina con agua. El agua de la piscina debe salir a una temperatura no menor de 70 °C y es enviada hacia la caja de agua caliente y de aquí, mediante bombas, hacia las torres de enfriamiento.

El mineral que sale del enfriador cae a una de las canales de contacto, por donde se introduce una corriente de una solución carbonato amoniacal formando una pulpa que va a los tanques de contacto, los cuales tienen una capacidad de 70 m<sup>3</sup>. Esta pulpa es bombeada a la planta de Lixiviación y Lavado a través de las bombas instaladas.

## **1.2 Aspectos generales de los materiales y equipos presentes**

A continuación se expondrán los aspectos generales de las materias primas presentes en este trabajo, así como los países productores y consumidores, además del precio que presentan en el mercado.

### **1.2.1 Carbón antracita**

La antracita es un carbón mineral de color negro brillante, muy duro, de buena calidad, alto contenido de carbono, poco material volátil y poca humedad, procede de la transformación del bituminoso, aunque puede arder con dificultad, desprende mucho calor y poco humo. El carbón antracita es un combustible de alto poder calorífico y de los más abundantes en la tierra.

El carbón tiene muchos usos importantes en todo el mundo. Los usos más importantes son la producción de electricidad, acero, la fabricación de cemento y otros procesos industriales, así como combustible líquido.



Este mineral se extrae directamente de las minas. Presenta bajo contenido de azufre, que le confieren unas excelentes propiedades para ser utilizado en procesos de reducción y también como fuente de energía. El carbón antracita es especialmente apropiado para usos de aportación de carbono/reductor, en procesos tales como el siderúrgico, metalúrgico y químico. La siguiente tabla nos muestra la composición química del carbón antracita.

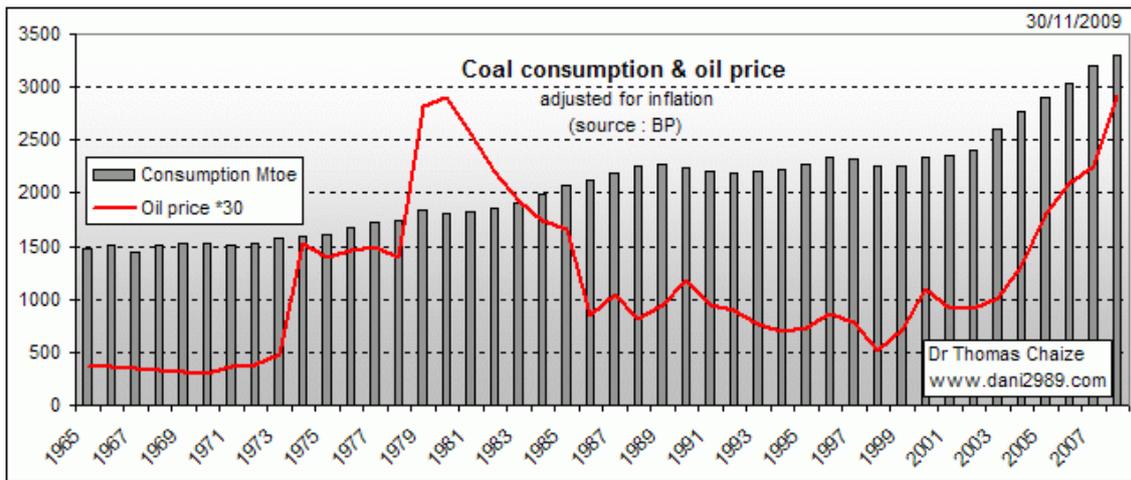
**Tabla 2** Composición química del carbón antracita

Humedad	10 %
Cenizas	2-10 %
Volátiles	2-3 %
Azufre	1 % máximo
Carbono fijo	88 % mínimo
Pcs kcal/kg	7000 mínimo

**Fuente:** Elaborado a partir de (García-Munté Energía, S.L, 2018)

Los principales yacimientos explotados comercialmente de carbón antracita se encuentran en China y Rusia, pero sus mayores reservas se encuentran en el continente africano y en el norte de Sudamérica (León, 2006).

La siguiente figura muestra la correlación entre el aumento en el consumo de carbón y el precio del petróleo.



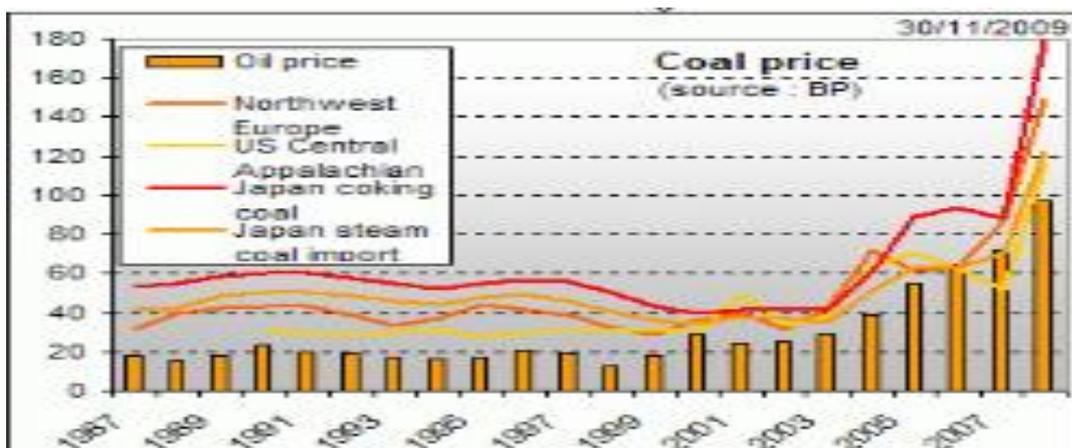
**Figura 1** Correlación entre el consumo de carbón y el precio del petróleo

**Fuente:** (Chaize, 2009)

Hasta 1973, el consumo de carbón era estable, luego de la primera crisis del petróleo el consumo mundial de carbón antracita aumenta. La segunda crisis del petróleo tiene el mismo efecto en el consumo mundial de carbón. Entre 1986 y 2000 el precio del petróleo se mantiene en un nivel muy bajo. Durante este período el consumo de carbón antracita se ha estancado con el precio del petróleo, a continuación desde el año 2000 con el aumento del precio del petróleo, el consumo de carbón en el mundo está creciendo fuertemente, incluso más que en las crisis del petróleo (Chaize, 2009).

### 1.2.1.1 Precio del Carbón antracita

El precio del carbón antracita puede variar en dependencia del cliente y el proveedor. El lugar de la producción de carbón es muy importante, si el carbón tiene que viajar 7 000 kilómetros hasta su consumidor, aumentará su costo. En la figura 2 se muestran los diferentes precios del carbón y el fuel-oil, en distintas zonas geográficas del planeta.



**Figura 2** Precios del Carbón y el fuel-oil en diferentes zonas geográficas

**Fuente:** (Chaize, 2009)

El precio del carbón antracita en la actualidad varía constantemente, teniendo en cuenta lo expuesto anteriormente. El precio del carbón que se utiliza en Cuba como aditivo en la reducción ronda los valores de 10 USD/t (Productora de Níquel y Cobalto (ECG), 2018).

### 1.2.2 Petróleo (Fuel-oil)

Este combustible, también llamado en España fuelóleo, es una fracción del petróleo que se obtiene como residuo en la destilación fraccionada. De aquí se obtiene entre un 30 y un 50 % de esta sustancia. Es el combustible más pesado de los que se pueden destilar a presión atmosférica. Está compuesto por moléculas con más de 20 átomos de carbono, y su color es negro. El fuel-oil se usa como combustible para plantas de energía eléctrica, calderas y hornos (www.EcuRed.cu, 2018).

#### 1.2.2.1 Clases de Fuel-oil

El fuel-oil se clasifica en 6 clases, de acuerdo a su punto de ebullición, composición y su uso. El punto de ebullición varía desde 175 hasta 600 °C, la longitud de la cadena de carbono que oscila de 9 a 70 átomos; y la viscosidad aumentan con el número de carbonos de la molécula, por ello los más pesados deben calentarse para que fluyan. El precio generalmente decrece a medida que el número aumenta.



## Fuel-oil pesado

Este término se refiere a distintas mezclas de combustibles líquidos de origen mineral de alta viscosidad. El fuel-oil pesado también se denomina "Heavy Fuel-Oil (HFO)", "Residual Fuel-Oil (RFO)" o combustóleo. En todo caso es un combustible particularmente económico que hoy en día se aplica intensamente en barcos. Según el país y el sector se compone principalmente de los residuos de ebullición difícil de la destilación del petróleo crudo y presenta una viscosidad mucho más alta en comparación con el fuel-oil liviano ([www.EcuRed.cu](http://www.EcuRed.cu), 2018).

Debido al alto contenido de azufre y nitrógeno en el combustible, el nivel de emisiones de los sistemas de combustión con fuel-oil pesado es definitivamente más alto que el que generan las plantas que utilizan fuel-oil liviano, de modo que el fuel-oil pesado se está aplicando cada vez menos en Europa Occidental. A ello se le añade la circunstancia que las tuberías del tanque y combustible deben calefaccionarse para poder bombearlo y atomizarlo.

Los fuel-oil pesado se diferencian sobre todo por su viscosidad, así como la participación porcentual de sus componentes. La densidad específica depende del porcentaje de las fracciones de petróleo y fluctúa entre 0,94 y 1,05 kg/l. El punto de inflamación del fuel-oil pesado es de aproximadamente 120 °C.

El fuel-oil pesado contiene una serie de sustancias acompañantes, parcialmente indeseadas que solo pueden determinarse con un análisis químico. Con estos valores es posible determinar las causas de una pobre combustión. A continuación se muestra una tabla con las sustancias indeseadas presentes en el fuel-oil.

**Tabla 3** Impurezas presentes en el fuel-oil

Agua	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Produce Pérdidas en la combustión y reduce el poder calórico.</li><li>❖ Formación de burbujas de vapor en el precalentador o en el quemador impidiendo la estabilidad de la combustión</li></ul>
Sedimentos	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Pueden precipitar como lodo en los tanques, obturar filtros y causar una abrasión significativa en las bombas, válvulas y pastillas de atomizadores.</li></ul>
Nitrógeno	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ El contenido de nitrógeno de 0,2-0,4 % es responsable de gran parte de las emisiones de óxidos de nitrógeno del sistema de combustión.</li></ul>
Azufre	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ El azufre se quema en gran parte y se transforma en dióxido de azufre, formando ácido sulfuroso en el efluente gaseoso y puede ser responsable de daños por corrosión en el circuito de los efluentes gaseosos.</li></ul>
Metales	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Sustancias como él (Va, Si, Al) pueden traer efectos negativos en la combustión.</li></ul>
Asfaltenos	<ul style="list-style-type: none"><li>❖ Formación de residuos de coque en la pastilla de atomización, la copa rotativa o las superficies de calentamiento.</li></ul>

**Fuente:** Elaborado a partir de ([www.EcuRed.cu](http://www.EcuRed.cu), 2018)

### 1.2.2.2 Costo del Fuel-oil

Como se conoce el fuel-oil es un residuo del petróleo, pero es muy importante en muchos procesos industriales. Su precio varía, dependiendo del proveedor y el cliente. A continuación en la tabla 4 se muestran algunos precios del fuel-oil a nivel mundial y el que se utiliza en Cuba actualmente.

**Tabla 4 Países consumidores de fuel-oil**

	Países consumidores	Precio
Fuel-oil	España	540 USD/t métrica
	Alemania	10 USD/kg
	República Dominicana	750 USD/t métrica
	México	70 USD/L
	Fuel-oil usado en Cuba	277,13 USD/t

**Fuente:** Elaborado a partir de (QuimiNet.com, 2017)

Según lo anterior, la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" se ve con la necesidad de sustituir parcial o totalmente el fuel-oil por carbón antracita, debido al alto costo que tiene este combustible y la dificultad para adquirirlo; que aunque se obtienen buenos índices de extractable, perjudica notablemente a la economía del país, ya que el costo de producción de una tonelada de carbonato básico de níquel (CBNi) es muy elevado.

### **1.2.3 Hornos de Soleras Múltiples (HERRESHOFT)**

La reducción se produce en el horno de hogares múltiples (HERRESHOFF), el cual cuenta con 17 hogares en total, con una altura total 23,5 metros de alto y 6,8 metros de diámetro y recubierto interior de ladrillos refractarios. Cuenta con 10 cámaras de combustión acopladas en los hogares 15, 12, 10, 8, 6 que distribuyen los gases a lo largo de todo el horno.

El mineral con una humedad inferior a 4,0 %, una fineza donde más del 80 % de las partículas son menores de 0,074 mm y mezclado con un aditivo, es alimentado por la parte superior del horno, hogar 0 y descarga el mineral reducido por el hogar 16.

El horno en su eje central tiene colocado cuatro brazos con dientes en cada hogar, facilitando el traslado del mineral de un hogar a otro; los hogares pares descargan por la periferia y los impares por el centro; produciendo un movimiento del mineral



dentro del horno en forma de zigzag mientras desciende y se pone en contacto con los gases que suben.

Durante la reducción se producen pérdidas notables debido a la formación de estructuras cristalinas que atrapan al níquel y cobalto en forma de óxidos y en menor grado en estado metálico, y la aparición de altos contenidos de hierro metálico en el mineral reducido, lo que trae como consecuencia que disminuya la extracción de níquel y cobalto en el proceso de lixiviación. Estas pérdidas se incrementan cuando se viola el perfil de temperatura y/o el perfil gaseoso dentro del horno (Peña, 2013).

### **1.3 Instalación para adicionar carbón antracita como aditivo en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara"**

Los finos de carbón antracita proveniente del rechazo del puerto se almacenan en el área donde estaba ubicado el electrofiltro del secadero 7 en la UBP Preparación de Mineral; la que se techó para que el carbón no incremente su humedad producto a las lluvias y se alimenta mediante un cargador a la tolva para la dosificación a la correa caliente (Guillen, 2016 b).

La tolva, en la que se depositará el carbón antracita, está ubicada sobre la correa caliente en la posición donde descargaba el secadero 7. El carbón se dosificará a la correa caliente por medio de un transportador sinfín, el motor del sinfín está conectado a un variador de velocidad.

El carbón antracita se deposita en la correa caliente TR-11 donde descargan los hornos de tambor rotatorio el mineral seco, de esta forma se mezclan y se transportan hasta los molinos de bolas para almacenarse en los silos y luego ser alimentado a los hornos de reducción.

En la posición donde se encuentra la instalación garantiza que el carbón antracita va a estar en contacto más tiempo con el mineral permitiendo una mayor homogeneización mineral-carbón.



### 1.3.1 Características del carbón antracita

Los finos de carbón antracita que se utilizan en la industria como aditivo tienen las características presentadas en la tabla 5.

**Tabla 5** Características de los finos de carbón antracita.

Material volátil (%)	Ceniza (%)	Azufre (%)	Carbón fijo (%)	Valor calórico (kcal/kg)	Granulometría (mm)								
					+6,36	-6,36	+4,76	-4,76	+2,50	-2,50	+1,19	-1,19	
11,22	6,71	0,62	82,07	7 671,26	2,86	1,88	10,27	38,21	46,78				

**Fuente:** (Guillen, 2016 b)

### 1.3.2 Acciones a realizar por el operador de petróleo aditivo para ajustar el porcentaje de fuel-oil a los transportadores TR-12 o TR-12A

Para la determinación de la cantidad (%) de petróleo aditivo a fijar se deberá partir del porcentaje que se adiciona antes del comienzo de la adición del carbón.

$$Y = A - X \tag{7}$$

Donde:

Y: es el valor (%) de petróleo aditivo a fijar una vez adicionando el carbón.

A: es el porcentaje (%) de petróleo aditivo que se agrega antes de adicionar el carbón.

X: Se calcula y corresponde al carbón equivalente, en %.

$$X = A * Z / 100, \% \tag{8}$$

Z: es el porcentaje (%) de carbón a adicionar en el TR-11 o TR-11A, entre 5 y 30%.

Finalmente se calcula Y.

### 1.4 Sustitución parcial del fuel oil por carbón antracita

En la tabla 6 se muestran los diferentes porcentajes a sustituir de petróleo aditivo por carbón antracita, utilizando información brindada por el departamento técnico de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", con datos del cierre de 2016,

en el año para el procesamiento de 2 049 073 t de mineral seco fue necesario utilizar 60 195,5 t de fuel-oil como aditivo, representando el 2,9 % (Guillen, 2016 b).

**Tabla 6** Petróleo aditivo a sustituir por carbón antracita

Petróleo aditivo a sustituir	Petróleo aditivo a sustituir	Carbón equivalente por Valor calórico	Petróleo aditivo 2016	Petróleo aditivo a sustituir	Carbón utilizado	Petróleo aditivo	Carbón Aditivo	Petróleo aditivo	Carbón aditivo
%	t/h	t/h	t/año	t/año	t/año	t/h	t/h	%	%
0	0,0	0,0	60 195,5	0,0	0	6,9	0,0	2,9	0,0
5	0,2	0,3	58 430,7	1 765	2 306	6,7	0,3	2,8	0,1
10	0,7	0,9	54 176,0	6 020	7 865	6,2	0,9	2,6	0,4
20	1,4	1,8	48 156,4	12 039	15 730	5,5	1,8	2,2	0,8
30	2,1	2,7	42 136,9	18 059	23 595	4,8	2,7	1,8	1,2

**Fuente:** (Guillen, 2016 b)

## 1.5 Antecedentes de la investigación

A continuación se hará una breve reseña sobre los estudios realizados previamente de la adición de fuel-oil, carbón antracita y otras materias primas al mineral.

### 1.5.1 Carbón antracita como aditivo

Con la adición de 1 a 4 % de carbón antracita al mineral, utilizando también gas reductor se mejora de forma significativa las extracciones de níquel y cobalto, (Lado, 1955) pero con carbón solo es insuficiente para la reducción de los minerales utilizados.

Con la adición de 1,0 % de carbón antracita al mineral procesado en el horno de reducción de planta piloto de Nicaro, se obtuvo como resultado valores bajos de extracción; 67,53 % de níquel y 49,44 % de cobalto. En el horno industrial 18 se utilizó también este aditivo a un 0,83 %, obteniéndose 67,56 % de níquel y 41,98 % de cobalto y a 0,85 % se logró 72,32 % de níquel y 38,8 % de cobalto, la temperatura en el Hogar 4 osciló entre 600 y 700 °C. Al realizar las pruebas en el horno 14 con 1,0 % de antracita se obtuvo 79,03 % de extractable de níquel y al incrementar a 2,0 % el carbón la extracción de níquel fue de 75,54 %. El porcentaje de carbón



utilizado es en base al carbón fijo presente en la antracita y se trabajó con gas pobre (García A. , 1985).

En 1985 Tavío utilizó la fracción fina del carbón antracita como aditivo en el proceso de reducción de mineral, realizó pruebas a escala de banco en el horno Selas a diferentes temperaturas, 650, 750 y 850 °C, un tiempo de retención de 10 minutos y concentraciones de aditivos de 3, 6, y 9 %. La velocidad de calentamiento para todos los casos fue 4 °C/min. No se consiguieron cambios favorables en las extracciones de níquel y cobalto, ni siquiera a 850 °C, que fue la temperatura óptima (Tavío, 1985) .

(Paz, 2015) Realizó pruebas de reducción en el Horno Selas a temperaturas de 730, 750 y 780 °C, utilizando como aditivos carbón antracita, carbón bituminoso y petcoke, sin la utilización de gas reductor. Preparando mezclas formadas por 0,5 % de fuel-oil y un 2,0 % de antracita, bituminoso o petcoke para completar el 2,5 % de aditivo y se realizó un blanco utilizando un 2,5 % de fuel-oil como agente reductor. Los mejores resultados de extracción de níquel y cobalto se logran con el blanco, utilizando 2,5 % de fuel-oil como aditivo mejorando con el aumento de la temperatura. Los resultados más bajos se producen con la mezcla de 0,5 % de fuel-oil y 2,0 % de carbón antracita.

Para una mezcla formada por 2,0 % de fuel-oil y 1,1 % de carbón antracita se obtuvo extracciones de níquel de 85,89 % y de cobalto de 60,76 %, todas las extracciones comparadas con las logradas con 2,5 % de fuel-oil, y para una mezcla de 1,8 % de fuel-oil y 1,3 % de carbón antracita se obtuvo el 83,04 % de níquel y el 56,45 % de cobalto.

En estudios realizados a escala de laboratorio se conoce que para no afectar las extracciones de níquel y cobalto sustituyendo de forma total el fuel-oil se necesita utilizar más de 14 % de carbón antracita con respecto a la masa total de mineral (Guillen, 2016 b).

### **1.5.2 Petróleo como aditivo**

(Onishin, 1968) Planteó que al reducir el consumo de gas pobre y utilizando 4 % de fuel-oil hay una ligera disminución de las extracciones de níquel y cobalto, de 92,4 hasta 89,7 % para el níquel, para el cobalto de 86,6 a 83,6 % para 125 y 50 m<sup>3</sup>/t de

mineral. Cuando se varía el porcentaje de aditivo de 1 a 4 % las extracciones de níquel aumentan pero al utilizar un 6 % las extracciones disminuyen.

Seguidamente se muestra la tabla 7 de las extracciones de níquel y cobalto con diferentes por cientos de aditivo expuestos anteriormente.

**Tabla 7** Extracciones de níquel y cobalto con diferentes % de fuel-oil

% aditivo	Extracciones (%) Para temperatura de 750 °C	
	Ni	Co
0	73,4	53
1	76,8	-
2	85,5	-
4	87,2	66,0
6	84,5	76,8

**Fuente:** (Onishin, 1968)

Según (Rodríguez, 1968) Con el incremento del porcentaje de fuel-oil como aditivo se incrementan las extracciones de níquel, al utilizar 1,03 % se logra extracciones de 79,40 %, al incrementarlo a 1,90 % las extracciones aumentan a 80,38 % y al utilizar 2,15 % las extracciones obtenidas son de 81,44 % y al compararlas con los hornos 19 y 20, las del horno 21 son superiores en todos los casos aumentando en 1,10; 1,88 y 3,43 %, con el aumento del % de fuel-oil como aditivo.

(Rezvanov & Castellanos, 1969) Plantean que el uso del fuel-oil conllevaría a un aumento del carbón en el mineral reducido, en el orden de 2 a 2,5 veces el cual influye a su vez de manera negativa en el proceso de lixiviación ya que existe una disminución de la velocidad de lixiviación del níquel en la primera etapa. Además disminuye la densidad y aumenta la viscosidad de la pulpa por el incremento del contenido de carbono fino en el mineral reducido, el cual al pasar a la pulpa forma espuma, que refleja la influencia del carbono contenido en el petróleo aditivo en procesos posteriores a la reducción.

La utilización de petróleo añadido directamente al mineral (aditivo) fue investigado por Onishin (1968) y otros técnicos entre los años 1968 y 1969 a nivel de laboratorio y banco en el Departamento de Investigaciones de la Fábrica de níquel René Ramos Latour, Nicaro. Los resultados alcanzados basados en el criterio de



incrementar el índice de reducción del níquel, motivaron que los productores comenzaran la introducción del 4 % de petróleo en los hornos industriales a partir de las pruebas en los hornos industriales experimentales. La instalación fue concebida por el personal de la Planta de Hornos utilizando los recursos existentes, introduciéndose el petróleo por la zona intermedia del horno mediante un atomizador.

El control de la adición se realizaba por medio de un integrador y el petróleo se tomaba de la línea de retorno. A pesar de la sencillez y pocas condiciones de la instalación, los resultados industriales provocaron el entusiasmo general y a medida que fue posible la introducción se generalizó. La aparición de afectaciones a la sedimentación motivó que se abandonara la operación. Se aclaró que los problemas de sedimentación se debían a sobrerreducción del mineral por exceso de reductores y se realizaron pruebas industriales, para la sustitución de parte del gas obtenido del carbón con petróleo. Con este criterio se llega a definir la adición de petróleo de 7 – 9 kg/t (0,7-0,9 %) de mineral y flujos de gas de 90 m<sup>3</sup>/t en lugar de los 145 m<sup>3</sup>/t usados anteriormente. Este régimen permitía sustituir una tonelada de carbón a hornos por 0,8 de petróleo. El uso de petróleo aditivo significó un gran aporte económico y simplificación de la operación. Los índices de extracción fueron semejantes aunque muchos defendían el aumento de la extracción (Onishin, 1968).

(Onishin, 1968) Realizó pruebas a escala industrial en la que se evaluó en una línea de dos hornos la sustitución total del gas por petróleo, demostrándose la operabilidad de los hornos, necesidad de dos inyectores para garantizar la estabilidad de la operación y que el extractable era muy cercano al de la operación con gas, pero la falta de medios para instalar la cantidad de inyectores necesarios, la inestabilidad de los equipos de inyección, y sobre todo el aumento de temperatura del enfriador de mineral definieron la interrupción de los intentos de usar petróleo solamente como agente reductor.

Según (Reid, 1990), los mejores resultados de la reducción se logran mediante la adición combinada de un 2,5 % de petróleo combustible y otros aditivos a la alimentación. Esta mezcla aumenta la eficiencia de la reducción del níquel, en amplias pruebas de laboratorio con agentes reductores de diferentes tipos, que



incluyen carbón de varias calidades, la adición de piritas y cloruro de sodio. Se demostró que ninguno de los materiales utilizados posee propiedades reductoras equivalentes o mejores que el petróleo combustible.

En 1990 se obtenían muy malos resultados del proceso en los hornos de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", debido en gran parte a que la planta de gas de carbón antracita, montada después que no se lograra la puesta en operación de la planta de gasificación del petróleo y de añadir petróleo al mineral por dos tipos distintos de equipos había fracasado. En el proyecto de intensificación de la reducción se definió profundizar en el estudio del uso del petróleo aditivo, pudiéndose definir que las condiciones que permitieron operar con éxito en la empresa "Comandante René Ramos Latour" y en Yabulu (Greenvale) no se podían aplicar en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" (Llana, Navarro, Pérez, 2009).

(García, 2010) Obtiene una valoración analítica del comportamiento del carbono que participa en el proceso de reducción, a partir de los parámetros de entrada y salida a la planta. Realiza una valoración económica de la nueva tecnología empleada para el suministro de petróleo aditivo a los hornos mediante lanzas automáticas; y pretende confirmar los resultados obtenidos en cuanto a extractable y consumo de combustible. Con la utilización de petróleo aditivo para la reducción directa en el horno, se analiza el comportamiento del carbono en el proceso de reducción amoniacal.

### **1.5.3 Otros aditivos para la reducción del mineral**

A continuación mostraran estudios precedentes sobre a otros agentes reductores que se utilizaron como aditivo para la reducción de los elementos más importantes presentes en el mineral.

#### **1.5.3.1 Asfaltita**

La existencia en Cuba de reservas considerables de minerales bituminosos conocidos como asfaltita, llevan a que se realicen numerosas investigaciones para su uso, existiendo poca información de carácter técnico (Herrera, 1968).

Con la utilización de asfaltita en un 1,0 % en el horno 13, se logran valores superiores a los alcanzados por el horno 14 sin empleo de aditivo en el mismo



período y superiores también a los blancos realizados en el mismo horno 13. Se utilizaron todas las pruebas con flujos similares de gas pobre (García A. , 1985).

Al adicionar asfaltita en un 4,0 % se logra un incremento del extractable de níquel de 70,8 a 82,2 % y cobalto de 56,7 a 59,7 %, en la reducción de un mineral serpentínico de 15 a 18 % de hierro. Al adicionar 1,0 % de asfaltita del peso del mineral se incrementa la extracción de níquel, además se logra sustituir hasta un 11,0 % el consumo de gas reductor al horno, lo que trajo aparejado una disminución del consumo de carbón antracita para la producción de gas pobre, el efecto es más notable cuando se trabaja con altas temperaturas. El tamaño de las partículas de la asfaltita se encontraba entre 1,5 y 3,0 mm (García A, 1986).

#### **1.5.3.2 Bagazo y cloruro de sodio**

Con el uso de un 4 % de bagazo y 1,0 % de cloruro de sodio además del gas reductor se logra incrementar las extracciones de níquel en 3,5 %; comparado con el uso de gas reductor (García A, 1986).

#### **1.5.3.3 Pirita**

Es la modificación más radical del proceso CARON original, el cual fue diseñado para tratar lateritas de los Estados Unidos pobres en níquel menor de un 1 % con un contenido de cobre apreciable. Lo común con el proceso es el uso de pirita como aditivo al mineral entre 1-2 % en peso. La tostación reductora se realiza a una temperatura de 525-550 °C, la recuperación de níquel es de 90-93 % y de cobalto oscila en un amplio rango de 80-92 %. En los elevados indicadores de recuperación de metales están incluidas las operaciones de lixiviación y lavado, en la primera se minimizan las pérdidas de cobalto por coprecipitación, debido al empleo de dos etapas de lixiviación con sulfato de amonio concentrado, en el cual es posible controlar la oxidación e hidrólisis de los iones de Fe (II) (Siemens & Corrick, 1977).

Con la adición simultánea de hasta un 4 % de pirita y hasta un 3 % de fuel-oil a mezclas lateríticas con alto contenido de serpentina. Los mejores resultados en el pilotaje fueron logrados con el cobalto, 70 %, mientras que el níquel se mantuvo en 80 %, límite tradicional, debido a las altas temperaturas empleadas de 700-760 °C que favorecieron la formación de forsterita (Rezvanov, 1985)



Piloteado y propuesto para el proyecto de Guanijabo en Puerto Rico. Este consiste en la adición de pirita o materiales contenedores de azufre y/o NaCl al mineral que contiene serpentina en apreciable cantidad logrando extracciones de 86-88 % níquel y 70 % de cobalto a una temperatura de reducción menor que la habitual de 650 °C, así como un menor tiempo de retención del material en el horno. Ambos factores contribuyeron a disminuir la formación de forsterita y a catalizar la disociación de los minerales serpentínicos (Chang, 2000).

#### **1.5.3.4 Petcoke**

El petcoke es utilizado para la gasificación a nivel mundial, la que consiste en convertir un combustible sólido en un gas limpio, cuya composición está formada principalmente de CO y H<sub>2</sub> (alrededor de 90 %) y de N<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>O y H<sub>2</sub>S. El CO y H<sub>2</sub> son gases vitales en el proceso de reducción de mineral de hierro (González, 2012).

(Guillen, 2016 a) utilizó petcoke como aditivo en pruebas de laboratorio en el horno Selas donde utilizó 1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 y 10 % de petcoke, incrementándose la extracción de níquel y cobalto con el aumento del contenido de petcoke, con un 10 % se logra el 96,9 y 98,6 % de las extracciones de níquel y cobalto respectivamente. Todas comparadas con las alcanzadas con 2,5 % de fuel-oil como aditivo.

Se realizaron mezclas de petcoke (1, 2, 3, 4, 5, 6, 8 y 10 %) con 0,5; 1,0; 1,5; 1,8 y 2,0 % de fuel-oil como aditivo donde se obtiene que al incrementarse el contenido de fuel-oil se necesita menos contenidos de petcoke para alcanzar las extracciones logradas con 2,5 % de fuel-oil.

Al realizar pruebas a escala piloto con la utilización de una mezcla de 1,5 % de fuel-oil con 3,0 % de petcoke como aditivo se logran extractables de níquel superiores en un 6,06 % y de 1,76 % para el cobalto, comparadas a las obtenidas con la adición de 1,5 % de fuel-oil como aditivo, y se logra extractable de níquel superior en un 3,42 % para 2,5 % de fuel-oil.

Según (Guillen, 2016 a) con el incremento de los precios del petróleo, en años anteriores, y la disminución de las reservas, la tendencia mundial en las industrias del níquel, producción de cemento y electricidad es de sustituir petróleo por carbón



o petcoke, recursos con menor precio en dependencia del proveedor y con suficiente reservas para garantizar la continuidad del proceso.

En la actualidad el petróleo tiene bajos precios pero los productores se han puesto de acuerdo para reducir la producción, Cuba no está exenta de las limitaciones en el suministro porque las producciones nacionales no son suficientes para cubrir las necesidades del país.

### **Conclusiones parciales**

- Según estudios realizados previamente, para no afectar las extracciones de níquel y cobalto, es conveniente no sustituir totalmente el fuel-oil por finos de carbón antracita.
- Se debe utilizar un porcentaje menor al 20 % de carbón antracita como aditivo para lograr buenas extracciones níquel y cobalto.
- Con la adición de carbón antracita en la correa caliente, se puede disminuir el consumo físico de fuel-oil, lo cual provocaría un ahorro de este portador energético para la industria.
- Todos los trabajos realizados se hicieron a escala de laboratorio y piloto, por lo que no existe una valoración de su aplicación desde el punto de vista industrial.



## CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

Para la realización de este capítulo es necesario mostrar la metodología que se utilizó. Los experimentos se llevaron a cabo en el horno Selas de la Unidad de Proyectos de Nicaro. Para las pruebas se utilizaron distintos materiales y métodos con el objetivo de obtener resultados en pos de lograr sustituir total o parcialmente el fuel-oil por finos de carbón antracita como agente reductor.

Las tareas realizadas para los experimentos son las siguientes:

- Obtención y preparación de muestras de mineral que se alimenta a la UBP Preparación de Mineral.
- Preparación de las muestras de carbón antracita que se va a utilizar en las pruebas a escala de laboratorio.
- Metodología para llevar a cabo los experimentos.
- Realización de los experimentos previstos.

### 2.1 Metodología para la preparación de las muestras

El mineral que se utilizó en las pruebas, fue tomado de la UBP Preparación de Mineral de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" en la correa caliente donde se descarga el mineral secado en los hornos de tambor rotatorio.

La preparación de la muestra se realizó por cuarteos sucesivos, utilizando los métodos de cono y anillo y el divisor acanalado. A continuación se muestra la tabla 8 con las variables y niveles utilizados en los experimentos.

**Tabla 8** Variables y niveles que se utilizaron para realizar los experimentos

Variable	Nivel	
	1	2
Temperatura (°C)	750	770
Fuel-oil (%)	2,0 y 1,8	2,0 y 1,8
Carbón antracita (%)	1,3 y 1,1	1,3 y 1,1

Las muestras de mineral para la realización de los estudios fueron determinadas por el método de cuarteo.

### 2.1.1 Cono y anillo

El método de cuarteo cono y anillo según (Mitrofánov, 1982), consiste en mezclar el material para posteriormente apilarlo a la forma de un cono, este se aplasta y se divide con una espátula en forma de cruz (cuatro partes iguales). Se retiran dos cuartos opuestos y las otras dos restantes partes que forman la nueva muestra se vuelven a mezclar y el proceso se repite varias veces hasta obtener el tamaño apropiado de muestra, como se representa en la figura 3.



**Figura 3** Método de cuarteo de cono y anillo para la homogenización de la muestra

Una vez que se tiene la muestra preparada, se procede al pesaje de la misma para obtener la cantidad con el que se trabajará durante el proceso.

La figura 4 muestra el divisor acanalado que se utilizó para la homogenización de la muestra.

### Divisor Acanalado



**Figura 4** Divisor Acanalado para la homogenización y el cuarteo de las muestras

Consiste en un recipiente en forma de V que tiene en sus costados una serie de canales o chutes que descargan alternativamente en dos bandejas ubicadas en ambos lados del cortador, como se muestra en la figura 4. El material es vaciado en la parte superior y al pasar por el equipo se divide en dos fracciones de aproximadamente igual tamaño.

### 2.1.2 Muestra de mineral

La muestra de mineral a procesar se obtuvo en la planta de Preparación de Mineral después del proceso de secado y antes de añadirle el aditivo en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", se tomaron 160 kg que se trasladaron hasta la Unidad de Proyecto Nicaro (UPN) donde se trituro, homogenizó y caracterizó. En la tabla 9 se muestran sus características.

**Tabla 9** Características fisicoquímicas del mineral

Ni	Co	Fe	MgO	Granulometría		
				+0,147 mm	-0,074 mm	-0,043 mm
%						
1,22	0,10	42,9	3,8	7,2	81,7	70,1

### 2.2 Muestra de carbón antracita

Los finos de carbón antracita provienen del rechazo del puerto de Moa y se almacenan en el área donde estaba ubicado el electrofiltro del secadero 7. Los análisis se realizaron en el laboratorio de la Unidad de Proyecto Nicaro del Centro de Investigaciones del Níquel, después que al carbón se le redujo el tamaño y fue homogenizado. El carbón utilizado presenta un 73,9 % de la clase -0,074 mm y 25,8 % de la clase +0,147 mm. En la figura 5 se observa los finos de carbón antracita en la tolva de recepción en la UBP Preparación de mineral.



**Figura 5** Muestra del carbón antracita

### **2.3 Puntos de muestreo en la industria**

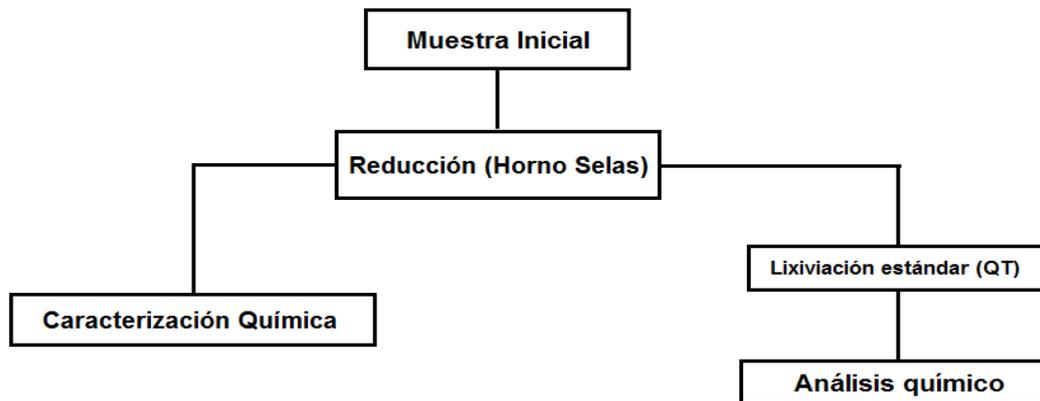
Con la utilización de carbón antracita para sustituirlo como aditivo se determinan los puntos que pueden afectarse por la entrada de carbón antracita al sistema. Estos puntos son los siguientes:

1. Descarga de la banda transportadora TR-11.
2. Descarga de la aspiración de la TR-11.
3. Muestra SM-5 o SM-6.
4. Mineral alimentado a los hornos.
5. Mineral reducido en la descarga de un enfriador de mineral.
6. Licor en primera etapa de lixiviación.

### **2.4 Procedimiento empleado para la realización de los experimentos**

Las pruebas con el petróleo aditivo se realizaron para un 2,5 % de este, donde se obtuvieron buenas extracciones de níquel y cobalto, que se utilizaron como referencia para las pruebas con carbón antracita, y la mezcla carbón-petróleo. Se realizaron pruebas con la sustitución total del petróleo aditivo por carbón antracita para un 2, 6, 10, 12 y 14 %. Además los experimentos se desarrollaron a la

temperatura de 750 y 770 °C, simulando la temperatura de reducción de los hornos en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Se substituyó el 20 y 30 % de fuel-oil por carbón antracita. Los contenidos para las pruebas mezcladas fueron de 1,8 y 2,0 % de fuel-oil y de 1,1 y 1,3 % de carbón antracita. A todos los experimentos se le realizaron tres réplicas. A continuación se observa la figura 6 con el flujo de las pruebas que se realizaron.



**Figura 6** Metodología de realización de experimentos

#### 2.4.1 Condiciones experimentales en el horno

Las condiciones en las que se realizó la reducción en los hornos Selas, se establecieron similares a las presentes en los hornos de la UBP Hornos de Reducción. En todas las pruebas se mantuvo los mismos parámetros que se muestran a continuación en la tabla 10.

**Tabla 10** Parámetros de operación del horno Selas

Parámetros	Nivel
Mineral alimentado	700 g
Temperatura	750 °C
Tiempo de retención total	70 min
Petróleo aditivo	2,5 %
Tiempo a la temperatura de reducción	10 min

**Fuente:** (Productora de níquel y cobalto (ECG), 2007)



El tiempo de residencia se prefijó en 70 minutos, basado en el informe de identificación del horno Industrial, el régimen de temperatura se prefijó bajo el criterio técnico de lograr en los primeros 30 minutos 575 °C. Además, al finalizar cada experimento la temperatura final deberá ser de 750 y 770 °C.

En los hornos Selas la cantidad de mineral a introducir en la botella es de 700 g. Para la primera prueba se utilizó como aditivo el 2,5 % de fuel-oil. Para la sustitución total de fuel-oil por carbón antracita se realizaron pruebas con el 2, 6, 10, 12 y 14 % de este último. Las pruebas que se realizaron mezcladas se sustituyeron el 20 y 30 % de petróleo por carbón. Los por cientos de carbón se aumentaron para corregir el déficit de este aditivo con respecto al calor del fuel-oil, ya que es inferior en 2 000 kcal/kg aproximadamente. Por eso el porcentaje a sustituir para el 20 % es de 1,1 % y para el 30 % es 1,3 %, según los requisitos exigidos por la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

#### **2.4.2. Descripción de los experimentos que se realizaron**

Luego de tener preparado los 700 g de mineral, el carbón antracita y el fuel-oil en el por ciento fijado por la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". Se prosigue a la mezcla de los materiales, o de forma independiente el carbón y el fuel-oil. Se anota en el reporte de la prueba, la fecha, codificación, hora de arranque, determinación, la temperatura del Horno Selas y de las botellas que se utilizan en la operación. El cumplimiento del régimen térmico planificado en el horno, para la reducción a escala de laboratorio para todos los experimentos realizados se garantizó según el procedimiento siguiente:

##### **2.4.2.1 Preparación de la muestra**

- Llenar las botellas con 700 g de mineral y petróleo aditivo ó mineral, petróleo y carbón antracita. El petróleo lo constituye el % solicitado de la masa de mineral a procesar.
- Montar cada una de las botellas dentro del horno en el lugar que le corresponde. El operador debe asegurarse que las mismas queden bien montadas y ajustadas.
- Luego se cierra una compuerta del horno, se colocan los termopares en cada botella.



#### 2.4.2.2 Encendido del horno Selas

- Se abre lentamente la válvula del cilindro de LPG (Gas licuado) que da paso a los 11 quemadores.
- Se enciende la mecha de encendido y se usa para encender cada quemador abriendo la puerta del horno, volteando la válvula de gas del quemador cerca de  $\frac{1}{4}$  logrando en la arrancada una temperatura de 400 °C.
- Para el encendido de cada quemador el flujo de gas licuado en el rotámetro no debe exceder la marca de 20, aunque según la situación que se presente se abre más o menos.
- Una vez encendidos todos los quemadores, el operador comienza a regular las llamas de cada uno de los quemadores, para lo que se abre la válvula general hasta un valor determinado y luego se va abriendo la válvula de cada uno de los quemadores hasta lograr la llama deseada.
- Verificar la válvula del regulador de presión del balón de LPG, tal que todas las válvulas de gas de los quemadores estén abiertas completamente, para lograr el calor máximo que se necesita en el horno.
- Se procede a cerrar herméticamente las puertas del horno garantizando la mínima pérdida de calor en el mismo.
- Se enciende el botón de arranque que hace girar las botellas.
- Después que se pone en marcha el equipo, la temperatura empieza a aumentar a razón de 6 °C/min y se toman lecturas de temperatura cada 3 minutos. Las botellas tienen unas paletas, que elevan el mineral una vez que el mecanismo que las mueve comienza a girar.
- Se prefija un aumento periódico de la temperatura de 18 °C hasta alcanzar los 750 o 770 °C, cuando alcanza esta temperatura que debe ser en una hora, después se mantiene la misma temperatura 10 minutos más.
- Se deja enfriar una hora aproximadamente hasta que alcanza una temperatura de 100 °C. Se sacan las botellas del horno, con las precauciones necesarias (añadir argón). Terminado el enfriamiento del mineral se procede a extraer una porción para la realización de las pruebas estándar de lixiviación (QT), la cual se efectúa para determinar el extractable de Ni y Co. Luego se inyecta argón al kitasato y se vierte el mineral reducido



en este, al mismo tiempo que se le inyecta este gas inerte a la botella para que no ocurra la reoxidación del mineral, esta operación se debe realizar entre dos operarios.

A continuación se muestran los pasos a seguir para realizar las pruebas de lixiviación estándar y la simulación de la primera etapa de lixiviación.

#### **2.4.2.3 Pasos para la realización de las pruebas donde se determina el extractable de níquel y cobalto (QT)**

- Tomar una muestra de mineral reducido (MR) para su análisis como muestra inicial, y otra para hierro metálico en un erlenmeyer con sulfato de cobre tomado previamente.
- Medir en un beaker con 400 ml de licor fresco (LF) y se tara en una balanza analítica.
- Al kitasato se introduce una corriente de gas inerte (argón).
- También se le introduce gas inerte al sinfín que se coloca en la boca del kitasato.
- Se pesa 100 g del mineral reducido.
- Se echa los 1000 ml restantes de licor fresco.
- Luego se depositan en el turbo enjuagándose para que no quede mineral en el recipiente.
- Se ajusta el agitador a la mazorca del motor, se tapa y se pone en agitación durante 2 horas y 45 minutos.
- Se extraen 300 ml de pulpa, se filtran, se lava la torta con agua amoniacal. No decantar el licor de los 300 ml de pulpa.
- Se coloca la torta en un vidrio reloj y se seca en la estufa.
- Se tritura en un mortero de porcelana la torta de mineral seca.
- Se vierte en un sobre, el cual se identifica y se envía para su posterior análisis en el laboratorio analítico.

A continuación en la tabla 11 se hace referencia de los parámetros de operación para la lixiviación estándar.



**Tabla 11** Parámetros de operación de la lixiviación estándar, para la determinación del extractable de níquel y cobalto

Relación Líquido/Sólido	14/1 (1400 ml LF/100 g MR)
Tiempo de retención	2 horas y 45 minutos
Aire	580 m <sup>3</sup> /kg de mineral ( Escala-C6 en 2,5)
Licor Fresco: Concentración de NH <sub>3</sub>	105-115 g/l
Concentración de CO <sub>2</sub>	85-90 g/l

**Fuente:** (Guillen, 2016 a)

#### 2.4.2.4 Pasos para la realización de las pruebas donde se simula la primera etapa de lixiviación (QTC)

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

- Se toma una muestra del mineral reducido para su análisis como muestra inicial, y otra para hierro metálico en un erlenmeyer con CuSO<sub>4</sub> tomado previamente.
- Medir en un beaker 250 ml de licor de contacto y se tara en una balanza analítica.
- Al kitasato se le introduce una corriente de gas inerte.
- También gas inerte al sinfín que se coloca en la boca del kitasato.
- Se pesan 250 g del mineral reducido.
- Se echan 1000 ml restantes de licor de contacto.
- Depositar en el turbo enjuagándose para que no quede mineral en el recipiente.
- Se ajusta el agitador a la mazorca del motor, se tapa y se pone en agitación durante 1 hora.
- Extraer 300 ml de la pulpa, se filtra, se lava la torta con agua amoniacal. No se debe decantar el licor de los 300 ml de pulpa.
- Colocar la torta en un vidrio reloj y se seca en una estufa.



- Se tritura en un mortero de porcelana.
- Se vierte en un sobre, se identifica y se envía al laboratorio analítico.
- A la pulpa lixiviada se le determina la velocidad de sedimentación después del electroimán así como se deja densificar 24 horas.
- Se tomara licor de la pulpa restante, se echara en recipientes para un posterior análisis químico.

La siguiente tabla (tabla 12) muestra los parámetros de operación en los turboaeradores para la simulación de la primera etapa de lixiviación.

**Tabla 12** Parámetros de operación, donde se realizaron las pruebas y se simula la primera etapa de lixiviación

Relación Líquido/Sólido	5/1 (1250 ml LF/250 g MR)
Tiempo de retención	1 hora
Aire	85 m <sup>3</sup> /kg de mineral ( Escala-C6 en 2,5)
Licor Fresco: Concentración de NH <sub>3</sub>	70-80 g/l
Concentración de CO <sub>2</sub>	55-65 g/l
Concentración de S	1,5-3 g/l

**Fuente:** (Guillen, 2016 a)

Para determinar el extractable de níquel y cobalto, se utiliza la ecuación (9), propuesta en el Manual de control y muestreo (1943) de la empresa "Comandante René Ramos Latour".

$$Ext. Ni = \left(1 - \frac{Ni_{cola} \cdot Fe_{alim}}{Ni_{alim} \cdot Fe_{cola}}\right) \cdot 100 \quad (9)$$

Donde:

*Ext. Ni* – extractable de níquel, %.

*Ni<sub>alim</sub>* - contenido de níquel en el mineral de alimentación, %.

*Fe<sub>alim</sub>* - contenido de hierro en el mineral de alimentación, %.



$Ni_{cola}$  - contenido de níquel en la cola residual de la lixiviación estándar QT, %.

$Fe_{cola}$  - contenido de hierro en la cola residual de la lixiviación estándar QT, %.

Para hallar el extractable de cobalto se utiliza la misma ecuación, pero sustituyendo donde está el contenido de níquel en el mineral de alimentación y el contenido de níquel en la cola residual de la lixiviación estándar (QT) por el cobalto.

## **.2.5 Equipos utilizados para la realización de los experimentos**

Los equipos que se utilizaron para la realización de estos experimentos son los siguientes:

- Horno Selas
- Turboaeradores (QT y QTC)
- Balanza digital

### **2.5.1 Descripción de la instalación de reducción**

El horno Selas es un equipo de trabajo a escala de laboratorio que permite el procesamiento simultáneo de 6 muestras diferentes. El equipo consiste en una cámara de combustión en la cual se quema LPG con aire suministrado por un compresor, cuenta con 11 quemadores para garantizar la temperatura de trabajo deseada. Las 6 botellas que contienen el mineral a reducir están herméticamente cerradas y unidas a un sistema de transmisión que les imprime movimiento rotatorio de 13 rpm. Cada botella en su interior tiene un termopar, para un total de seis y un séptimo termopar que registra la temperatura de la cámara del horno, todas las señales van a un registrador común de temperatura. En la parte superior del horno tiene una campana para la succión de los gases por un extractor.

El gas licuado se suministra al tanque distribuidor desde un balón de 100 lb que tiene un regulador de presión situado en la conexión de salida.

En este horno se debe tener una mecha, la que utilizando diésel y un fósforo pueda encender la llama. Además esta mecha debe estar situada en el extremo de una varilla de metal o madera de no menos de 60 cm de longitud. A continuación se muestra la figura 7 del horno Selas.



**Figura 7** Horno Selas

### 2.5.2 Recipiente para el traslado de las muestras (Kitasato)

Un kitasato es un matraz comprendido dentro del material de vidrio de un laboratorio. Podría definirse como un matraz de Erlenmeyer con un tubo de desprendimiento o tubuladura lateral. Sirve para realizar experimentos con agua, como destilación, filtraciones al vacío. A continuación se muestra los kitasatos utilizados en la figura 8.



**Figura 8** Kitasato el cual se utiliza para transportar el mineral reducido

### 2.5.3 Descripción de la instalación de lixiviación (QT y QTC)

La instalación experimental es la QT que cuenta con seis turboaeradores, cada reactor metálico con capacidad para 2,5 litros provisto de 2 deflectores y sistema de aireación. La agitación de la pulpa se logra por medio de un mecanismo de agitación acoplado a un motor que permite el movimiento simultánea a cada uno de ellos. El flujo de aire necesario se mide y ajusta a través de rotámetros instalados al sistema de aireación de cada reactor mediante un tubo de 5 mm de diámetro interior que baja desde el lateral superior hasta el fondo del turboaerador, como se muestra en la figura 9.



**Figura 9** Instalación para la lixiviación QT y QTC

### 2.5.3.1 Características de la instalación QT

Seguidamente en la tabla 13 se expondrán las características de la QT.

**Tabla 13** Características de los turboaeradores de la QT

Características	Dimensiones
Diámetro del turboaerador (mm)	136
Altura del turboaerador (mm)	230
Diámetro del impelente (mm)	35
Ancho del bafle (mm)	25
Altura del bafle (mm)	140
Agitación (rpm)	1100

**Fuente:** (Guillen, 2016 b)

El impelente que se utiliza para el movimiento del licor dentro del turboaerador se muestra en la figura 10.



**Figura 10** Impelente

En la tabla 14 aparecen las características del impelente.

**Tabla 14** Características del impelente

Características	Dimensiones
Ancho de la paleta del impelente (mm)	13
Largo de la paleta del impelente (mm)	15
Espesor de la paleta del impelente (mm)	1
Diámetro del eje del impelente (mm)	5
Largo del eje del impelente (mm)	300
Separación del fondo del turboaerador al impelente (mm)	5
Velocidad de rotación del impelente (rpm)	1100

**Fuente:** (Guillen, 2016 b)

#### 2.5.4 Balanza digital

Las balanzas digitales son instrumentos de pesaje de funcionamiento no automático que utilizan la acción de la gravedad para determinación de la masa. Se compone de un único receptor de carga (plato) donde se deposita el objeto para medir. La balanza digital tiene como característica principal la exactitud en la precisión de los resultados que refleja. En la figura 11 se observa la balanza utilizada para el pesaje de las muestras.



**Figura 11** Balanza digital

En la tabla 15 se exponen las principales características de la balanza utilizada en los experimentos realizados a escala de laboratorio.

**Tabla 15** Características de la balanza digital

Pesaje máximo:,	10 kg
Error D	0,1 g
Marca	Radwag
Corriente	220 V

### 2.5.5 Probetas para determinar la velocidad de sedimentación

Las probetas se utilizan para determinar la velocidad de sedimentación después de la lixiviación. Son probetas de 1000 ml donde se vierte la pulpa que se encuentra en cada turboaerador. Para conocer la velocidad de sedimentación estas se dejan reposar 24 horas. La figura 12 muestra las probetas que se utilizaron para medir la velocidad de sedimentación.



**Figura 12** Probetas que se utilizan para la sedimentación

## 2.6 Técnicas analíticas utilizadas

Las técnicas analíticas son muy importantes para el desarrollo de cualquier investigación. Gracias a ellas es posible determinar los contenidos de diferentes elementos presentes en las muestras que se analizan.

### 2.6.1 Técnica de Absorción Atómica

Para determinar el extractable de los elementos presentes en las muestras, se utilizó la técnica analítica de espectrofotometría de absorción atómica. Con esta técnica se pudo conocer con toda exactitud el contenido de los elementos que se muestran a continuación: níquel, cobalto, hierro, magnesio. En la figura 13 se muestra el equipo de espectrofotometría de absorción atómica utilizado.



**Figura 13** Equipo de Espectrofotometría de Absorción Atómica (SP-9)

Este método consiste en hacer pasar el elemento a analizar a su forma atómica en estado libre por medio de la llama, a través de la cual se hace incidir una radiación continua, que es característica para cada elemento. A través de un dispositivo adecuado se realiza la selección de la radiación y medida de la variación de la intensidad de la luz, relacionada directamente con la concentración del elemento. Esquemáticamente se distingue de la forma siguiente:

Fuente -----Atomizador -----Monocromador -----Registro y medición.

### **2.6.2 Analizador infrarrojo automático**

El método que se utiliza para determinar el contenido de carbono y azufre según la norma cubana (NC – 621-3:2015) se basa en la combustión de la muestra en presencia de oxígeno, en un horno de alta frecuencia, dando lugar a la formación de dióxido de carbono y dióxido de azufre, logrando la determinación cuantitativa de estos componentes a través del analizador infrarrojo automático con balanza analítica acoplada, en correspondencia con el peso de la muestra y los factores de calibración.

El flujo ininterrumpido de oxígeno garantiza la limpieza del sistema, evitando además la ocurrencia de interferencias o envenenamiento de los sensores u otras partes del analizador. Las concentraciones de azufre y carbono se emitirán

automáticamente por el equipo y se mostrarán en el monitor de la computadora acoplada al mismo.

A continuación se muestra el equipo utilizado (figura 14) para la determinación del contenido de carbono y azufre.



**Figura 14** Analizador infrarrojo automático

### Conclusiones parciales

- El mineral empleado para la realización de estos experimentos, es representativo con respecto al mineral que se utilizó en el período que se tomaron la muestras en la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".
- Al mineral se le aplicaron las metodologías de beneficio correspondientes, obteniendo un producto acorde a los requisitos y parámetros de operación trazados por la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".
- Las pruebas analíticas, así como los experimentos, se llevaron a cabo en equipos certificados, alcanzando así, la veracidad de los resultados obtenidos.

### CAPÍTULO 3 ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

En el presente capítulo se hace un análisis de los resultados obtenidos a partir de los experimentos realizados a escala de laboratorio, con la sustitución total o parcial de fuel-oil por carbón antracita como aditivo. Además realiza una estimación económica sobre el costo que implica sustituir fuel-oil por finos de carbón antracita, teniendo en cuenta los precios de ambos en el mercado internacional, así como las complejidades que puede traer el abastecimiento a nuestro país de dichos aditivos.

Para la evaluación y comparación de los resultados a escala de laboratorio, se tomó las extracciones de níquel y cobalto en el mes de mayo de 2018 en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara".

En la tabla 9 del capítulo anterior se muestran las características del mineral alimentado. El contenido de níquel es de 1,22 % y de cobalto de 0,10 % en el mineral utilizado para los experimentos. Con este contenido de níquel y cobalto, se logran extracciones elevadas, asegurando que los extractables de níquel y cobalto cumplan con los resultados esperados, aumentando la eficiencia de las extracciones.

Las pruebas realizadas en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", reflejaron los siguientes resultados del análisis químico al carbón antracita donde se muestra que es un aditivo muy importante para la reducción. Los resultados obtenidos se reflejan en la tabla 16 mostrada a continuación.

**Tabla 16** Resultados de análisis químico al carbón antracita

Carbón, %	Azufre, %	Valor calórico, kcal/kg	Cenizas, %
76,40	0,65	7 200,03	12,89

Estos resultados indican que en la muestra analizada de carbón antracita, el contenido de azufre es inferior al presente en el fue-oil. Sin duda es favorable para el proceso de reducción, debido a que se formaría una menor cantidad de dióxido de azufre, lo que conlleva a que ocurran menores daños en las instalaciones a causa de la corrosión. Analizado lo anterior, el bajo contenido de azufre, es un



aspecto positivo que se debe considerar para la utilización de carbón antracita como sustituto del fuel-oil en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" llevando un riguroso control de su adición debido a que presenta un poder calórico inferior al petróleo, por lo que se debe utilizar en mayor medida, siempre y cuando no afecte las extracciones de níquel y cobalto.

Significativo es el contenido de materiales volátiles con valores superiores a otros carbones, lo que resulta de gran interés, pues favorece su posible empleo como agente reductor durante el proceso de reducción.

La siguiente tabla nos refleja los resultados del análisis químico realizado al fuel-oil que se utilizó para las pruebas a escala de laboratorio.

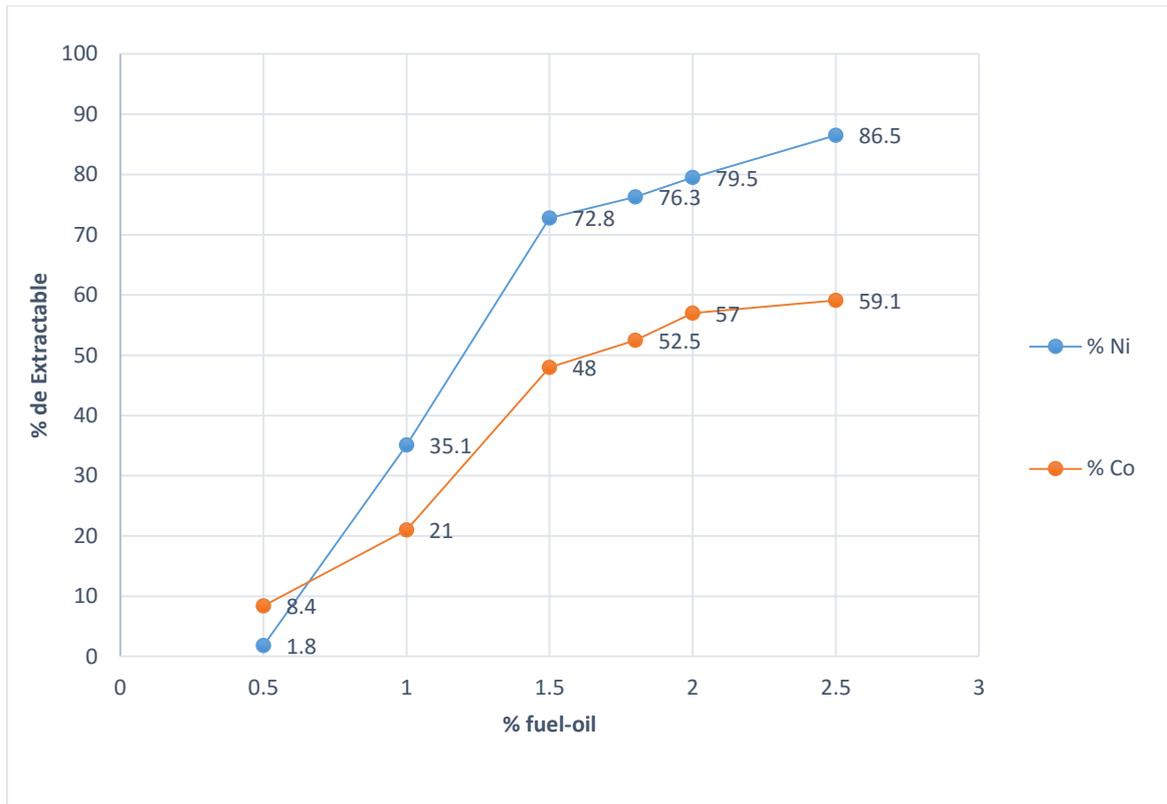
**Tabla 17** Resultados del análisis químico al fuel-oil

Carbón coradson %	Azufre %	Valor calórico kcal/kg	Humedad %
12,54	2,33	9 836,87 kcal/kg	0,2

### 3.1 Discusión de los resultados obtenidos

A continuación se exponen los resultados de los experimentos que se realizaron en la Unidad de Proyectos de Nicaro, con los distintos porcentajes de fuel-oil mencionados en el capítulo anterior.

Seguidamente se muestra la figura 15, en la cual aparece el comportamiento del extractable de níquel y cobalto, en función de los diferentes por cientos de fuel-oil a nivel de laboratorio.

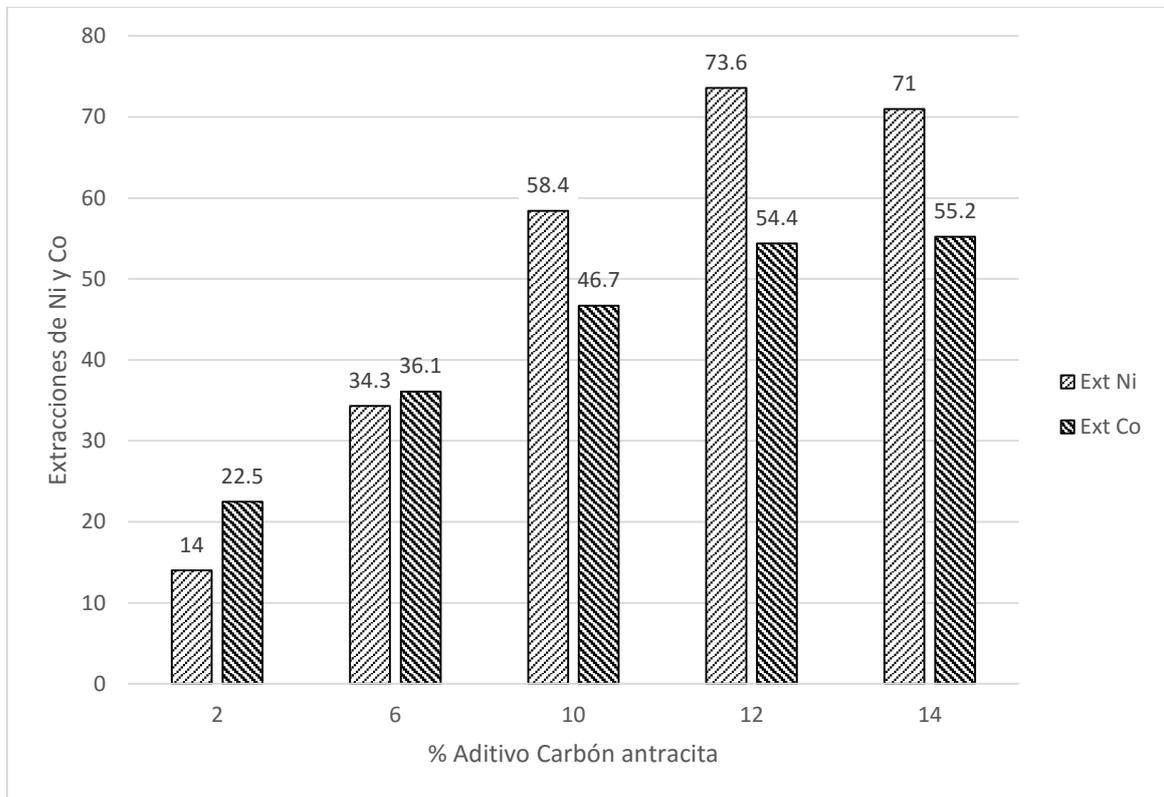


**Figura 15** Extractable de Ni y Co utilizando diferentes % de fuel-oil a la temperatura de 750 °C

En la figura anterior se muestran las extracciones de níquel y cobalto que se logran con distintos porcentajes de fuel-oil. Los resultados obtenidos evidencian que a medida que se aumenta el % de fuel-oil, aumentan los extractables de níquel y cobalto. Los mejores resultados se obtuvieron con el 2,5 % de fuel-oil, con un contenido en el extractable de 86,5 % de níquel y 59,1 % de cobalto, por lo que se tomó como blanco estos valores, ya que las extracciones con 0,5 y 1,0 % fueron muy bajas. Según lo antes planteado el fuel-oil es un aditivo que brinda un porcentaje elevado en las extracciones de níquel y cobalto. El empleo de fuel-oil como agente reductor, es muy efectivo, y eso lo evidencia su uso en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" desde la década del 90 donde se empezó a utilizar, añadiéndolo directamente al mineral.

### 3.2 Experimentos realizados con diferentes porcentos de carbón antracita

En la figura 16 se muestran los resultados del segundo diseño de experimento, donde se observa como es el comportamiento del extractable de níquel y cobalto, cuando se utiliza diferentes por cientos de carbón antracita.



**Figura 16** Extracciones de níquel y cobalto con diferente % de Carbón antracita a 770 °C

En esta figura se observa que a medida que el porcentaje de carbón antracita aumenta, las extracciones se incrementan, utilizando hasta un 12 % de antracita. Cuando se utiliza un contenido mayor al 12 % (14 %) estas extracciones comienzan a disminuir, a pesar de los altos % de carbón antracita; es decir que adicionando el 14 % de carbón antracita no asegura altos niveles de extractable de níquel. Si se aumentara aún más el por ciento de carbón antracita puede que la tendencia sea de permanecer constante, para esto es necesario realizar pruebas con mayores porcentajes de carbón antracita. Planteado lo anterior se llega a la conclusión que, para lograr un extractable de Ni y Co que se acerque al obtenido con 2,5 % de fuel-



oil, se deben utilizar menos del 14 % de carbón antracita. Sin embargo las extracciones de cobalto siguen aumentando a medida que el contenido de carbón aumenta, por lo que sí es favorable para lograr reducir en mayor porcentaje el contenido de cobalto. La mayor extracción de níquel que se obtuvo con el carbón antracita es de 73,6 %, mientras que la mayor extracción de cobalto es de 55,2 %, disminuyendo con respecto a las obtenidas con 2,5 % de fuel-oil, en un 12,9 % de níquel y en 3,9 % las de cobalto.

Al observar lo obtenido desde un punto de vista económico, la utilización del carbón antracita que se encuentra en los depósitos de rechazo como agente reductor, provoca que las extracciones de níquel y cobalto sean inferiores, afectando la eficiencia metalúrgica de la UBP Hornos de Reducción. El precio de estas toneladas de rechazo que se utilizan es inferior a lo que costaría adquirir el carbón en el mercado internacional, debido a que el precio del mismo ronda los 339,33 USD/t sin haber sido clasificado granulométricamente y los 542,84 USD/t siendo de primera calidad. Por tanto la utilización solamente de carbón antracita en el proceso de reducción, no es más económico que el empleo de fuel-oil como agente reductor, conllevando a que el costo de producción de una tonelada de Sínter de níquel sea más elevado.

Por otra parte la utilización de este carbón también puede traer efectos graves a la economía. Según los estudios realizados un mayor porcentaje de carbón antracita en los hornos, conllevaría a un arrastre de sólidos a la planta de Lixiviación y Lavado, como consecuencia de que el carbón no se quema completamente a la temperatura de trabajo del horno (770 °C), teniendo como resultado una disminución de la velocidad de lixiviación del níquel en la primera etapa. También provocaría que exista una disminución en la densidad de la pulpa. Además aumenta la viscosidad de la pulpa por el incremento del contenido de carbono fino en el mineral reducido, el cual al pasar a la pulpa forma espuma, siendo perjudicial para los procesos posteriores.



### 3.3 Extracciones de níquel y cobalto cuando se utilizan mezclas de carbón y fuel-oil

A continuación se muestra la tabla 18 con los extractables de níquel y cobalto, cuando se sustituye el 20 y 30 % de fuel-oil por carbón antracita a escala de laboratorio. A cada mezcla de fuel-oil y carbón antracita se le realizaron tres réplicas, para observar el comportamiento del extractable a una misma temperatura de 750 °C en el horno Selas.

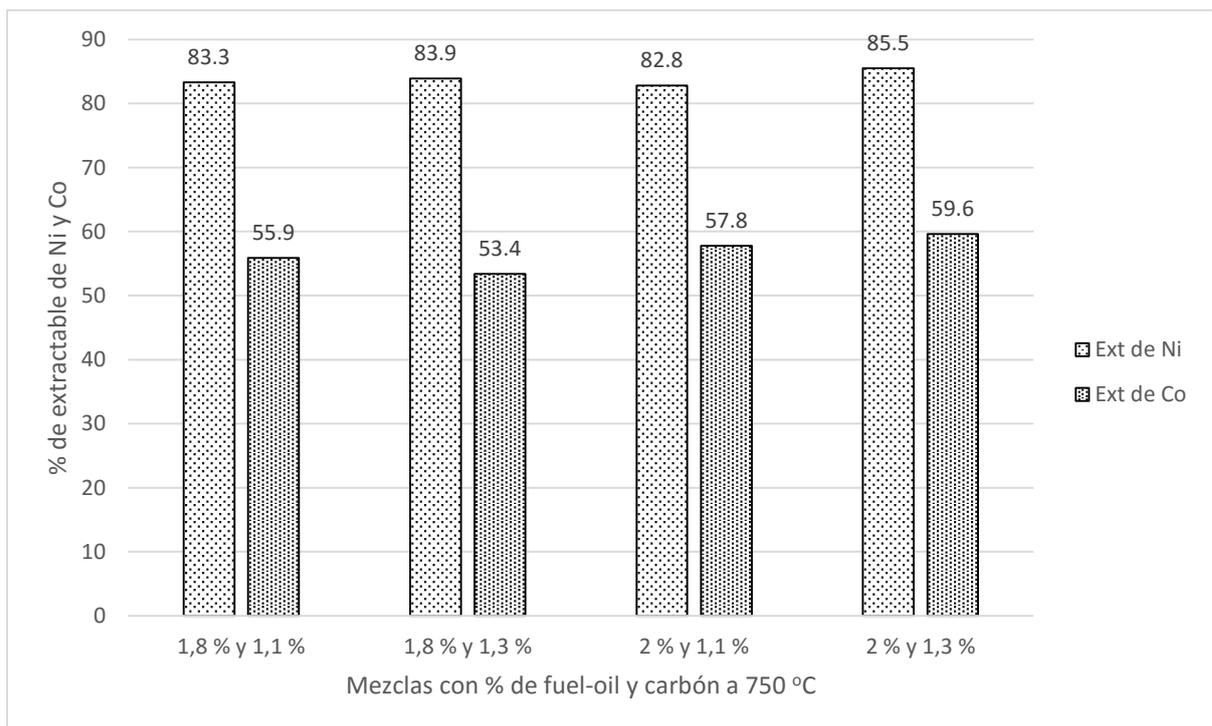
**Tabla 18** Extractables de Ni y Co obtenido del diseño de experimento

Réplicas	Temperatura (°C)	% Fuel-oil	% Carbón	Ext. Ni (%)	Ext. Co (%)
1	750	1,8	1,1	83,3	55,9
2	750	1,8	1,1	78,6	54,7
3	750	1,8	1,1	81,1	58,5
1	750	1,8	1,3	83,2	54,7
2	750	1,8	1,3	83,9	53,4
3	750	1,8	1,3	80,8	58,0
1	750	2,0	1,1	82,8	57,8
2	750	2,0	1,1	84,7	59,6
3	750	2,0	1,1	81,2	59,0
1	750	2,0	1,3	85,5	59,6
2	750	2,0	1,3	84,8	57,9
3	750	2,0	1,3	80,8	51,2

Para estos experimentos a cada mezcla se le realizaron tres pruebas, para ver el comportamiento del extractable. Según la tabla 18, el mayor porcentaje de

extractable de Ni y Co, se obtuvo con la sustitución del 20 % de fuel-oil por carbón antracita. Estos resultados se obtuvieron con la adición de 2,0 % de fuel-oil y 1,3 % de carbón antracita. Los porcentos de extractable para esta mezcla fueron, 85,5 % de níquel y 59,6 % de cobalto, acercándose bastante a los obtenidos en el banco con 2,5 % de fuel-oil. Aunque con la adición de 2,0 % de fuel-oil y 1,1 % de antracita se obtuvieron buenos extractables de níquel y cobalto, con un porcentaje de 84,7 % de Ni y 59,6 % de Co. Visto lo anterior, las mejores extracciones de níquel y cobalto ocurren con la adición de fuel-oil como aditivo, sin embargo se pueden obtener extracciones cercanas a las alcanzadas con fuel-oil, con la adición conjunta de fuel-oil y carbón, siempre que el fuel-oil esté presente en mayor medida. Con estas mezclas de aditivos se logra una disminución en el consumo físico de fuel-oil en la industria, reflejado en el plan anual de consumo de petróleo aditivo.

Seguidamente se muestra en la figura 17, el comportamiento del extractable de níquel y cobalto, utilizando diferentes mezclas fuel-carbón expuestas en la tabla 18.



**Figura 17** Comportamiento del níquel y cobalto con diferentes porcentos de carbón antracita y fuel-oil a la temperatura de 750 °C



A continuación se muestra la tabla 19 con las extracciones de níquel y cobalto a escala de laboratorio a la temperatura de trabajo del horno de 770 °C.

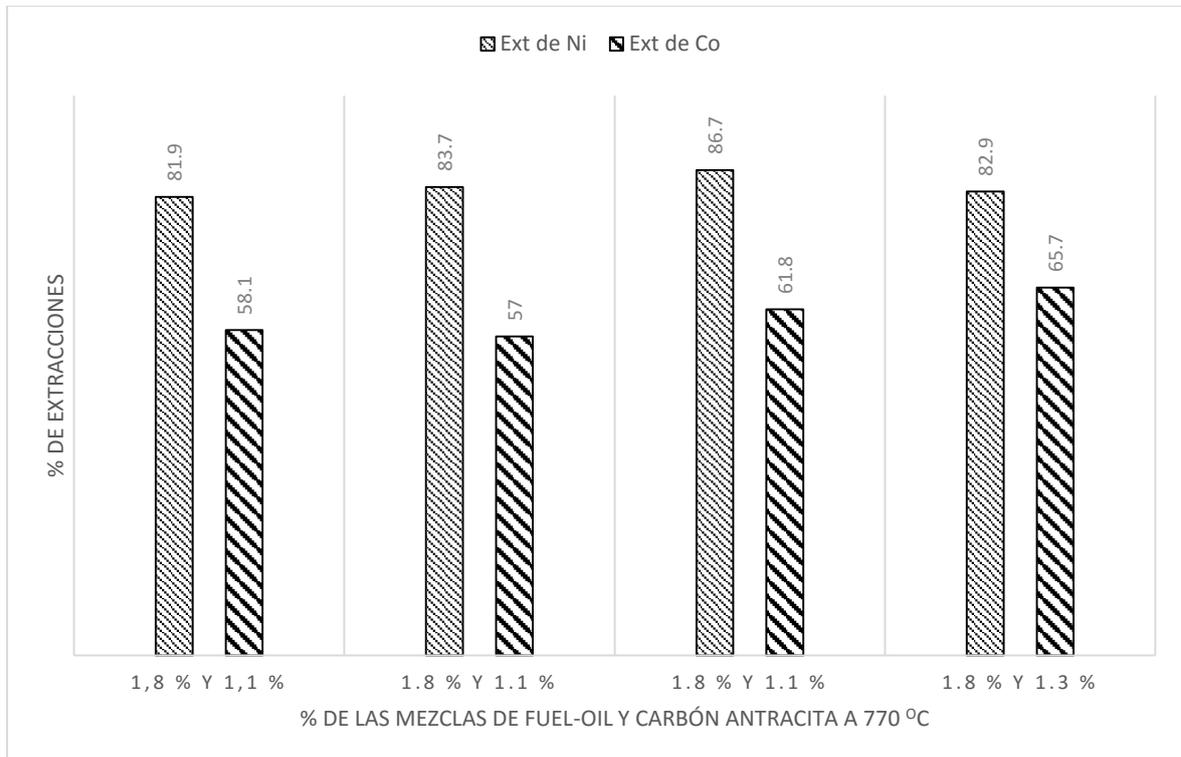
**Tabla 19** Extracciones de níquel y cobalto a 770 °C

Réplicas	Temperatura (°C)	% Fuel oil	% Carbón	Ext. (%)	Ni Ext. (%)	Co
1	770	1,8	1,1	80,6	54,5	
2	770	1,8	1,1	81,9	54,4	
3	770	1,8	1,1	81,0	58,1	
1	770	1,8	1,3	83,7	57,0	
2	770	1,8	1,3	83,0	56,6	
3	770	1,8	1,3	82,4	55,9	
1	770	2,0	1,1	84,5	61,3	
2	770	2,0	1,1	86,7	58,9	
3	770	2,0	1,1	86,6	61,8	
1	770	2,0	1,3	82,9	60,6	
2	770	2,0	1,3	82,7	60,9	
3	770	2,0	1,3	81,9	65,7	

Como se muestra en la tabla 19 las mejores extracciones de níquel y cobalto se obtienen sustituyendo el 20 % de fuel-oil por carbón antracita. Para la mezcla formada por 2,0 % de fuel-oil y 1,1 % de carbón antracita se obtienen las mejores extracciones de níquel, alcanzando un valor de 86,7 % y de cobalto de 58,9 %. Mientras que las mejores extracciones de cobalto se logran con la mezcla de 2,0 % de fuel-oil y 1,3 % de carbón antracita con un extractable de 65,7 % de cobalto, mientras que las de níquel no superan el 82 %, exactamente 81,9 %. Como lo refleja

la tabla a la temperatura de 770 °C, se obtiene un extractable de níquel y cobalto, superior a las obtenidas a la temperatura de 750 °C.

La figura siguiente (figura 18) nos muestra el comportamiento del extractable de níquel y cobalto a escala de laboratorio, sustituyendo el 20 y 30% de fuel-oil por finos de carbón antracita a la temperatura de 770 °C.



**Figura 18** Comportamiento del extractable de níquel y cobalto a escala de laboratorio a la temperatura de 770 °C

Para este experimento se le realizaron tres réplicas a cada mezcla de fuel-oil y carbón antracita en el horno Selas de la Unidad de Proyectos de Nicaro. Las extracciones de níquel y cobalto tienden a aumentar, alcanzando un valor máximo de 86,7 % de níquel y 65,7 % de cobalto con la adición de 2,0 % de fuel y 1,1 % de carbón antracita y 2,0 % de fuel y 1,3 % de carbón antracita respectivamente.

Se observa en la figura anterior que a medida que parámetros como la temperatura y el por ciento de fuel-oil aumentan, las extracciones de níquel van en aumento y comienzan a disminuir una vez que se sustituye 2,0 % de fuel-oil y 1,3 % de carbón.



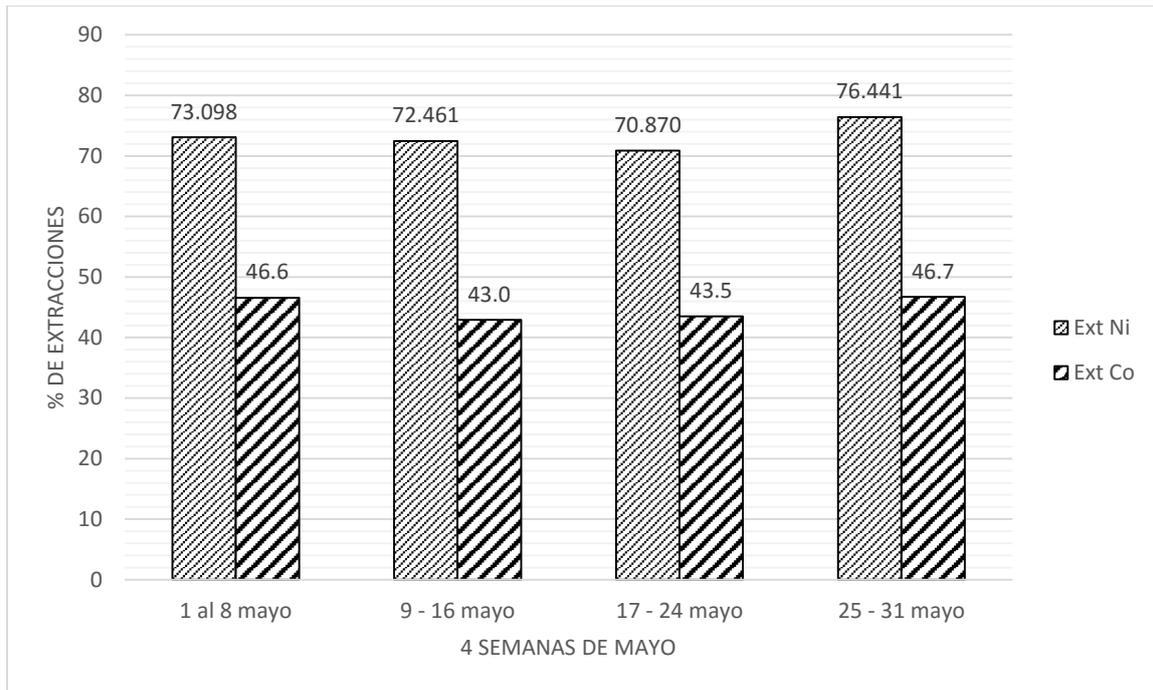
Mientras que las extracciones de cobalto evidencian un ligero aumento de forma constante en las doce réplicas utilizadas con los distintos porcentajes de aditivo.

Según lo observado en las figuras 17 y 18 con los mismos porcentajes de fuel-oil y carbón antracita a diferentes temperaturas (750 y 770 °C), las mejores extracciones de níquel y cobalto se obtiene a la temperatura de 770 °C. Sin embargo existe mayor regularidad en los contenidos de níquel y cobalto a 750 °C. Estas extracciones obtenidas a diferentes temperaturas son mayores a las que se consigue en la industria actualmente, esto puede suceder porque el mineral a escala de laboratorio permanece más tiempo en el horno; aunque a escala de laboratorio solo se obtienen los reductores con el mineral alimentado (aditivo), mientras que en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" gran parte de los reductores se producen con la adición de petróleo o mezclas petróleo-carbón antracita, mientras que un porcentaje menor se logra con la combustión incompleta del fuel-oil en las 10 cámaras de combustión que tienen los hornos HERRESHOFT.

Si se obtuvieran extracciones como las antes expuestas, la sustitución parcial del fuel-oil por finos de carbón antracita fuera muy factible para el proceso de reducción. Ahorrando ciertas cantidades considerables de fuel-oil, se le daría uso productivo a las toneladas de carbón antracita como sustituto parcial y se obtendrían excelentes extracciones de níquel y cobalto.

### **3.4 Comportamiento de las extracciones de níquel y cobalto en el mes de mayo de 2018**

En la figura 19 se observa el comportamiento de las extracciones de níquel y cobalto promedio en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" en las 4 semanas de mayo de 2018, cuando se sustituye el 10 % de fuel-oil por finos de carbón antracita. En el anexo 1 se muestra el comportamiento de las extracciones de níquel y cobalto en el mes.

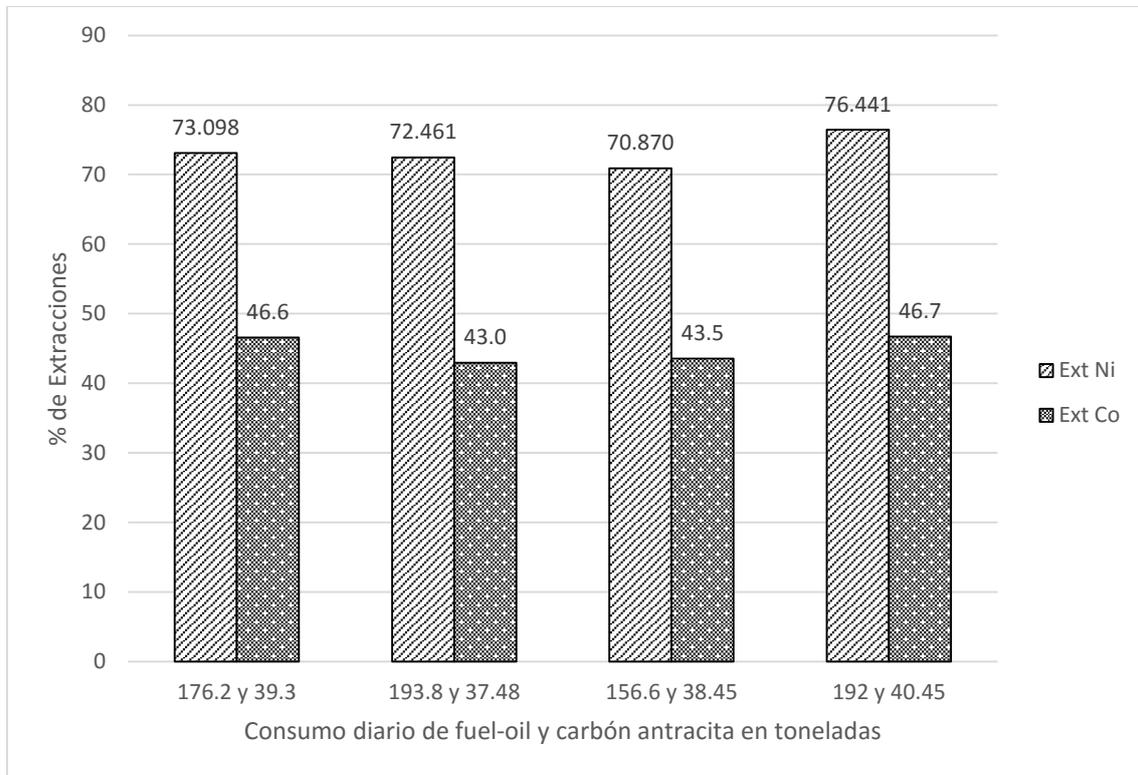


**Figura 19** Extracciones de níquel y cobalto en las 4 semanas del mes de mayo

Como se observa en la figura, las extracciones de níquel y cobalto cuando se sustituye el 10 % de fuel-oil por carbón antracita comienzan a disminuir, después del día 8 del mes de mayo, por el bajo contenido de níquel en el mineral y los diferentes parámetros de operación, como la adición de fuel-oil y carbón al mineral. Las extracciones de níquel tienen tendencia a descender hasta el 24 de mayo, alcanzando un valor promedio mínimo de 70,870 % de níquel. A partir del día 25 comienza a aumentar el contenido de níquel en el mineral alimentado, permitiendo que las extracciones de níquel aumenten hasta alcanzar un valor promedio de 76,441 %. Mientras que el extractable de cobalto va disminuyendo a medida que transcurre el mes con un valor mínimo de 42,951 %, que se alcanza del 9 al 16 de mayo. El contenido de cobalto aumenta a partir del 17 de mayo con valores constantes cercanos a 46,713 % en la última semana del mes. Estas variaciones en el contenido de níquel y cobalto pueden generarse a partir de las diferentes leyes de níquel y cobalto presentes en el mineral que es procesado diariamente.

La figura 20 muestra el comportamiento de las extracciones de níquel y cobalto en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" con la sustitución del 10 % de fuel-oil por finos de carbón antracita en las cuatro semanas del mes de mayo. El

consumo de los diferentes portadores energéticos (fuel-oil y carbón antracita) está dado en toneladas por día, dosificados en los transportadores TR-12 y TR-11 respectivamente.



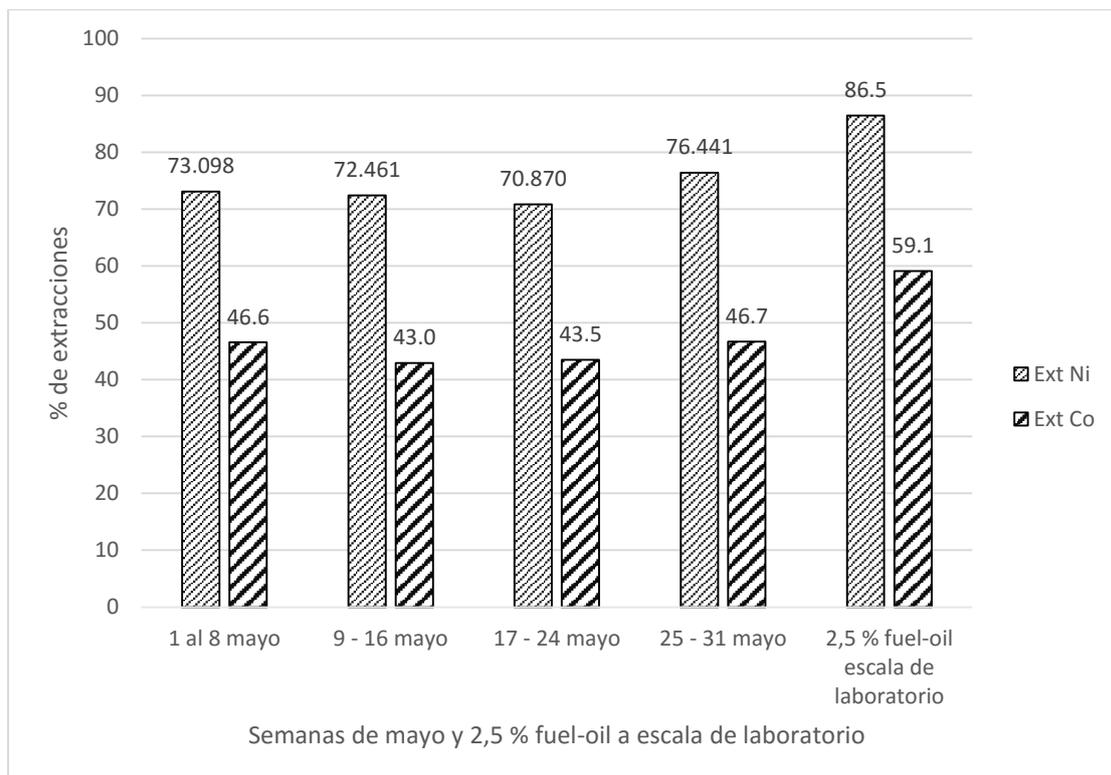
**Figura 20** Porcentaje del extractable de níquel y cobalto contra el consumo diario de fuel-oil y carbón antracita en toneladas

La anterior figura hace referencia a las mismas extracciones de la figura 19, pero ahora teniendo en cuenta el consumo diario de fuel-oil y carbón antracita en el mes de mayo. Observando el gráfico, un mayor consumo de fuel-oil solamente, no determina que las extracciones sean mejores. Sin embargo las mayores extracciones ocurrieron cuando se consume más fuel-oil y carbón antracita juntos. Por ejemplo en la primera semana se consume como promedio diario 176,2 t de fuel-oil y 39,3 t de carbón antracita para procesar 5 971,453 t de mineral seco. En la segunda semana se adicionaron 193,8 t de fuel-oil y 37,48 t de carbón antracita diario, por 5 700,493 t de mineral. En la tercera semana se procesaron 5 848,520 t de mineral y se consumieron 156,6 t de petróleo aditivo y 38,45 de finos de carbón antracita, donde se obtuvieron los menores porcentajes de extractable de níquel y cobalto. A partir del día 25 es que se obtiene como promedio el mejor porcentaje

de extracciones de níquel y cobalto y se consumen 192 t de fuel-oil y 40,45 t de carbón antracita para procesar 6 152,098 t de mineral laterítico.

Analizando esto, se obtuvieron mayores porcentajes de extractable, cuando se procesó mayor cantidad de mineral y se consumió mucho combustible y carbón al mismo tiempo. Lo que conlleva a analizar que las extracciones de mayor porcentaje se obtienen, en gran parte a las características físico-químicas del mineral, sin olvidar la efectividad del fuel-oil como agente reductor, generando el volumen suficiente de gases reductores ( $\text{CO} + \text{H}_2$ ) en los hornos.

Las pruebas realizadas a escala de laboratorio en el horno Selas utilizando 2,5 % de fuel-oil, se tomó como referencia, debido a que en la industria, la adición de petróleo constituye del 2,5 a 2,9 % del total de la masa de mineral y petróleo que llega a los hornos de Reducción. A continuación se muestra la figura 22 donde se observa la comparación del extractable de las 4 semanas de mayo y el extractable que se obtuvo en el horno Selas para el 2,5 % de fuel-oil.



**Figura 22** Comparación del extractable obtenido en la industria y el obtenido con un 2,5 % de fuel-oil a escala de laboratorio



Este gráfico muestra que las extracciones de níquel y cobalto que se obtienen a escala de laboratorio, son superiores a las obtenidas a escala industrial, teniendo en cuenta los mismos parámetros de temperatura. Las pruebas en el horno Selas realizadas en la Unidad de Proyectos de Nicaro, muestra un contenido de níquel en el extractable superior al 80 %, específicamente 86,5 %. La diferencia porcentual entre el extractable de níquel a escala de laboratorio e industrial es de 10,06 %. Mientras que las extracciones de cobalto se acercan al 60 %, algo que en el mes de mayo, el extractable obtenido en la industria no arroja resultados ni siquiera cercanos a este, con una diferencia de 12,387 %.

Desde el punto de vista económico, las extracciones a escala industrial en el mes de mayo son muy bajas y afectan la eficiencia metalúrgica de la planta y en general de la industria.

### **3.5 Estimación económica**

En el presente trabajo de diploma se hizo una valoración desde el punto de vista económico, para observar cuál de los dos aditivos (fuel-oil y carbón antracita) es más factible para la economía.

Según datos ofrecidos por el departamento técnico de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara", el precio de una tonelada de carbón antracita de primera calidad en el mercado internacional, ronda los valores de 542,84 USD/t. El fuel-oil que se utiliza como aditivo tiene un precio de 277,13 USD/t.

El carbón utilizado como aditivo en el proceso de reducción es el que se encuentra en los depósitos de rechazo en el Puerto de Moa y Cayo Guam y la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" lo adquiere a un precio de 10 USD/t.

Planteado lo anterior, se muestran dos escenarios sustituyendo el 10 % de fuel-oil por carbón antracita, pero utilizando los dos precios comentados previamente de carbón. Es decir un escenario para 542,84 USD/t y el otro para 10 USD/t.

En la tabla 21 se muestran los gastos en carbón y petróleo, teniendo en cuenta la productividad de mineral alimentado, cuando se sustituye un 10 % de fuel-oil por finos de carbón antracita en el mes de mayo de 2018. El precio del carbón es de 542,84 USD/t.



**Tabla 21** Costos de la sustitución del fuel-oil por carbón antracita (precio del carbón 542,84 USD/t)

t/h mineral	t/d carbón	Gastos en carbón USD/t	Fuel-oil no consumido t/d	USD t/d fuel no gastado	Diferencia 5-3 en USD
235.3	37.1	20159.5	28.4	7874.4	-12285.1
269.8	42.6	23114.0	32.6	9028.4	-14085.6
265.9	42.0	22777.1	32.1	8896.8	-13880.3
254.4	40.1	21791.1	30.7	8511.7	-13279.4
257.7	40.7	22077.7	31.1	8623.6	-13454.1
239.8	37.8	20543.7	29.0	8024.4	-12519.2
231.2	36.5	19803.5	27.9	7735.3	-12068.2
236.2	37.3	20234.3	28.5	7903.6	-12330.7
205.1	32.4	17571.0	24.8	6863.3	-10707.7
237.9	37.5	20374.6	28.7	7958.4	-12416.2
241.6	38.1	20696.2	29.2	8084.0	-12612.2
243.5	38.4	20858.4	29.4	8147.4	-12711.0
244.6	38.6	20947.9	29.5	8182.3	-12765.6
244.5	38.6	20947.6	29.5	8182.2	-12765.4
239.0	37.7	20474.2	28.9	7997.3	-12476.9
243.9	38.5	20894.0	29.4	8161.3	-12732.8
222.1	35.1	19027.9	26.8	7432.4	-11595.5
253.1	39.9	21677.7	30.6	8467.4	-13210.3
228.7	36.1	19586.0	27.6	7650.3	-11935.6
242.5	38.3	20769.6	29.3	8112.7	-12656.9
261.1	41.2	22365.8	31.5	8736.2	-13629.7
271.4	42.8	23246.5	32.8	9080.1	-14166.3
234.3	37.0	20073.8	28.3	7840.9	-12232.9
236.3	37.3	20243.4	28.5	7907.1	-12336.3
240.1	37.9	20563.2	29.0	8032.1	-12531.1
253.8	40.0	21740.2	30.6	8491.8	-13248.4
267.4	42.2	22905.2	32.3	8946.8	-13958.3
268.5	42.4	23002.5	32.4	8984.9	-14017.7
261.2	41.2	22371.0	31.5	8738.2	-13632.8
252.2	39.8	21603.3	30.4	8438.3	-13165.0
251.2	39.6	21516.1	30.3	8404.3	-13111.8
7634.5	1204.7	653957.1	921.7	255437.9	-398519.2

En el mes de mayo, se sustituyeron 921,7 toneladas de fuel-oil por 1 204 t de finos de carbón antracita en la UBP Hornos de Reducción. Sustituyendo las 921,7 toneladas de fuel, la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" ahorra 255 437,9 USD. Sin embargo el costo de utilizar 1 204 toneladas de carbón como sustituto del fuel-oil es de 653 957,1 USD, siendo el costo de carbón mucho mayor al de fuel-oil. Sustituyendo el fuel-oil por carbón antracita se gastan 398 519,2 USD



más, de lo que se consumiría en USD sin sustituir el fuel-oil. Dicho lo anterior, con el precio del carbón antracita de primera calidad, no es rentable su sustitución debido al alto gasto económico que le generaría a la empresa.

A continuación en la tabla 22 se muestra el segundo escenario, con el precio del carbón de 10 USD/t.

**Tabla 22** Gastos en fuel-oil y carbón antracita sustituyendo el 10% de fuel, cuando el precio del carbón antracita es de 10 USD/t

t/h mineral	t/d carbón	Gastos en carbón USD/t	Fuel-oil no consumido t/d	USD t/d fuel no gastado	Diferencia 5-3 en USD
235.3	37.1	371.4	28.4	7874.4	7503.0
269.8	42.6	425.8	32.6	9028.4	8602.6
265.9	42.0	419.6	32.1	8896.8	8477.2
254.4	40.1	401.4	30.7	8511.7	8110.3
257.7	40.7	406.7	31.1	8623.6	8216.9
239.8	37.8	378.4	29.0	8024.4	7646.0
231.2	36.5	364.8	27.9	7735.3	7370.5
236.2	37.3	372.7	28.5	7903.6	7530.8
205.1	32.4	323.7	24.8	6863.3	6539.6
237.9	37.5	375.3	28.7	7958.4	7583.1
241.6	38.1	381.3	29.2	8084.0	7702.8
243.5	38.4	384.2	29.4	8147.4	7763.1
244.6	38.6	385.9	29.5	8182.3	7796.4
244.5	38.6	385.9	29.5	8182.2	7796.3
239.0	37.7	377.2	28.9	7997.3	7620.1
243.9	38.5	384.9	29.4	8161.3	7776.4
222.1	35.1	350.5	26.8	7432.4	7081.8
253.1	39.9	399.3	30.6	8467.4	8068.0
228.7	36.1	360.8	27.6	7650.3	7289.5
242.5	38.3	382.6	29.3	8112.7	7730.1
261.1	41.2	412.0	31.5	8736.2	8324.2
271.4	42.8	428.2	32.8	9080.1	8651.9
234.3	37.0	369.8	28.3	7840.9	7471.1
236.3	37.3	372.9	28.5	7907.1	7534.2
240.1	37.9	378.8	29.0	8032.1	7653.2
253.8	40.0	400.5	30.6	8491.8	8091.3
267.4	42.2	422.0	32.3	8946.8	8524.9
268.5	42.4	423.7	32.4	8984.9	8561.1
261.2	41.2	412.1	31.5	8738.2	8326.1
252.2	39.8	398.0	30.4	8438.3	8040.4
251.2	39.6	396.4	30.3	8404.3	8007.9
7634.5	1204	12047.0	921.7	255437.9	243391.0



En el segundo escenario se observa que la diferencia entre el fuel-oil que es sustituido y el carbón que se sustituye es favorable. El costo de las toneladas de fuel-oil que se sustituyen es el mismo, pero el costo de las 1 204 toneladas de carbón que se utilizan como sustituto, y se compra a 10 USD/t, le cuesta a la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" 12 047,0 USD. Esto sin duda es factible para la empresa ya que se ahorran 243 391,0 USD sustituyendo fuel-oil por carbón antracita.

En estos momentos la utilización del carbón antracita que se encuentra en los depósitos de rechazo, como sustituto de una parte del fuel-oil como aditivo es rentable y generaría un ahorro significativo para la economía del país.

Cuando este carbón se agote en las instalaciones donde se encuentra, la empresa debería plantearse la opción de no sustituir el fuel-oil por finos de carbón antracita en ningún porcentaje, debido a que el precio del carbón es muy elevado (542,84 USD/t) y en lugar de contribuir a la economía, aumentaría el costo de producción de una tonelada de Sínter de níquel. Para que se pudiera utilizar como aditivo su precio en el mercado internacional no debería sobrepasar los 250 USD/t.

### **3.6 Valoración ecológica**

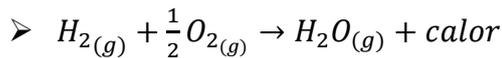
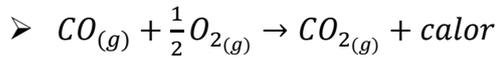
En la UBP Hornos de reducción se generan un gran volumen de gases para calentar y reducir el mineral, principalmente el monóxido de carbono (CO) e hidrogeno (H<sub>2</sub>). Una parte de estos gases se obtienen por la combustión incompleta del fuel-oil en las cámaras de combustión, mientras que la mayoría de estos agentes reductores (80%) se logra cuando se mezclan tanto el fuel-oil como el carbón antracita con el mineral para que exista mayor contacto entre el mineral y los gases reductores.

El monóxido de carbono es altamente tóxico. Puede causar la muerte cuando se respira en niveles elevados. Durante el proceso de reducción en los hornos HERRESHOFT, una parte del monóxido de carbono y el hidrogeno no son consumidos por las reacciones químicas presentes en el mineral, debido a esto se suministra un flujo de aire por los hogares 4 y 6 para quemar estos gases denominado aire para la post-combustión. El monóxido de carbono y el hidrógeno reaccionan con el oxígeno formando dióxido de carbono y vapor de agua, logrando



evitar la entrada de estos gases a los electrofiltros, los cuales pueden provocar explosiones en estos costosos equipos. Además se reduce la emisión de monóxido de carbono a la atmosfera el cual resulta ser muy perjudicial para las personas y el medio ambiente.

A continuación se muestran las reacciones de combustión de estos gases.



Los gases que se emanan a la atmósfera después que salen de los electrofiltros contienen la siguiente composición aproximada de (CO +H<sub>2</sub>) mostrada en la tabla 23, considerando que se trabaja con la máxima productividad y una temperatura de salida de los gases del sistema de limpieza de gases de 300 °C.

**Tabla 23** Composición de los gases purificados que se vierten a la atmósfera

Concentración de CO	2-3,5 % máximo
Concentración de H <sub>2</sub>	1-2,5 % máximo
Concentración de polvo	200 g/m <sup>3</sup>

### Conclusiones parciales

Según lo expuesto en el capítulo 3, se llega a la conclusión de que:

- La sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita que se realizó a escala de laboratorio, demostró que los mejores resultados se obtienen cuando se utiliza la mezcla de 2,0 % de fuel-oil y 1,1 % de carbón antracita a 770 °C, logrando extracciones de 86,7 % de níquel y 58,9 % de cobalto. Este resultado se comparó con las extracciones obtenidas con finos de carbón antracita, fuel-oil y con las logradas en las mezclas fuel-carbón.
- Las extracciones obtenidas en los 31 días del mes de mayo de 2018 son inferiores a las que se obtienen a escala de laboratorio como consecuencia de los bajos porcentajes de níquel y cobalto presentes en el mineral



alimentado a la UBP Hornos de Reducción. Otra causa que provoca los bajos índices de extractable es la inestabilidad en la alimentación de los hornos, provocando la irregularidad en la temperatura de trabajo del horno.

- Cuando se acaben las toneladas de carbón existente en las instalaciones del Puerto de Moa y Cayo Guam no es rentable la compra de carbón para sustituir el fuel-oil parcialmente, debido al alto precio del carbón en el mercado internacional con un valor de 542,84 USD/t.



## CONCLUSIONES GENERALES

- Se evaluó la sustitución del 20 y 30 % a escala de laboratorio, y la sustitución del 10 % a escala industrial del fuel-oil por finos de carbón antracita como agente reductor en la UBP Hornos de Reducción. Las mejores extracciones de níquel y cobalto se obtienen a escala de laboratorio, sustituyendo el 20 % de fuel-oil por carbón antracita con valores de 86,7 % de níquel y 65,7 % de cobalto a la temperatura de 770 °C. Sin embargo las extracciones a nivel industrial fueron inferiores a las obtenidas a nivel de laboratorio, debido a las diferencias en las características físico-químicas del mineral. Por último, la sustitución parcial del fuel-oil por finos de carbón antracita no es rentable teniendo en cuenta el precio actual del carbón antracita (542,84 USD/t) en el mercado internacional.



## RECOMENDACIONES

- Realizar experimentos a nivel industrial con el 20 y 30 % de carbón antracita como sustituto del fuel-oil para mejorar las extracciones en la UBP Hornos de Reducción.
- Según la estimación económica que se realizó, la sustitución de fuel-oil por finos de carbón antracita no es rentable para el proceso y lo correcto sería no sustituir fuel-oil por carbón antracita cuando se acaben las toneladas existentes en el Puerto de Moa y Cayo Guam, debido al alto precio de este.



## BIBLIOGRAFÍA

- Alepuz, H. (2009). Reseña histórica de la sustitución del gas de carbón antracita como reductor por petróleo añadido directamente al mineral. *Tecnología Química*, pp. 22-30.
- Chaize, T. (30 de noviembre de 2009). *www.dani2989.com*. Obtenido de *www.dani2989.com*.
- Chang, C. (2000). Conferencia Internacional de aprovechamiento de recursos minerales CINAREM ". Archivo de CEDINIQ, Nicaro.
- García. (2010). *Comportamiento del carbono en el mineral con la utilización de petróleo aditivo en el proceso de reducción de los hornos de hogares múltiples en la Empresa "Comandante René Ramos Latour" de Nicaro*.
- García, A. (1985). Pruebas de adición de asfaltita en los hornos de planta metalúrgica primera etapa. *Archivo Unidad de Proyecto, Nicaro*.
- García, A. (1986). *Informe resumen de las pruebas de adición de asfaltita en los hornos de reducción*. Archivo Unidad de Proyecto Nicaro.
- García-Munté Energía, S.L. (2018). *www.García-Munté Energía, S.L.com*.
- González, V. (2012). *Gasificación del Coque de Petróleo Calcinado Para la Producción de Gases Reductores (H<sub>2</sub> y CO) Usados en la Reducción de Pellas de Mineral de Hierro*.
- Guillen, C. S. (2016 a). *Uso de finos de carbón antracita como aditivo en la reducción en la industria*.
- Guillen, C. S. (2016 b). *Informe de aditivo antracita etapa 4 " Uso de finos de carbón antracita como aditivo en la reducción en la industria"*.
- Guillen, C. S. (2016 c). Informe Técnico Etapa 03 Proyecto "Utilización de petcoke como aditivo en la reducción a escala de Laboratorio y Piloto". CEINNIQ Moa.
- Guillen, C. S. (2016 d). *Informe etapa 05 Petcoke. Utilización de petcoke como aditivo en la reducción a escala de Laboratorio y Piloto*.
- Herrera, V. (1968). Estudio de las mezclas de asfaltita y fuel oil para uso como combustible industrial. *Archivo NicaroTec*. .
- Lado, A. E. ( 1955). Selas furnace reduction. Summary report of all work to date. *Archivo Unidad de Proyecto, Nicaro*.
- León, E. (2006). La importancia del carbón mineral en el desarrollo. *FIGMMG Vol. 9, Nº 18 , 91-97*.
- Llanzana, H. A., Navarro, E. L., & Pérez, I. M. (2009). Reseña Histórica de la sustitución del gas de carbón antracita como reductor por petróleo añadido directamente al mineral. *Tecnología química*, 22-30.
- Mitrofánov, S. (1982). *Investigación de la capacidad de enriquecimiento de los minerales*.
- Onishin, B. (1968). *Utilización del fuel oil como reductor líquido para la reducción de los minerales de la fábrica de Nicaro*.



- Paz, M. (2015). Procesamiento en el Horno Selas de mineral de la SM4, utilizando como aditivo petróleo mezclado con carbón antracita, con petcoke y con carbón bituminoso. *Archivo Unidad de Proyecto Niaro*.
- Peña, R. (2013). *Influencia del número de cámaras en operaciones y condiciones de operación en horno de reducción de la Empresa René Ramos Latour*.
- Productora de níquel y cobalto (ECG). (2007). *Manual de Operaciones*.
- Productora de Níquel y Cobalto (ECG). (2018). *Precio del carbón antracita*.
- QuimiNet.com. (2017). Obtenido de QuimiNet.com: [www.QuimiNet.com](http://www.QuimiNet.com)
- QuimiNet.com. (2017). Obtenido de QuimiNet.com.
- Reid, G. (1990). Conferencia sobre las características de la reducción del mineral laterítico impartida en el CILA.
- Rezvanov, G. (1985). "Extracción De Cobalto De Las Menas De Buruktal, Empleando La Tecnología Hidrometalúrgica" ., *Revi sta Tsvetnie Metally*, 9 - 14.
- Rezvanov, G., & Castellanos, J. Y. (1969). *Estudio sobre el uso del petróleo aditivo para la reducción del mineral laterítico*. Nicaro.
- Rodríguez, M. (1968). *Informe sobre los resultados obtenidos en la adición de petróleo al horno 21*.
- Siemens, R., & Corrick, J. (1977). Process for Recovery of Níkel, Cobalto and Copper from Domestic Laterites,. *Mining Congress Journal*, p. 29-34.
- Tavío, G. (1985). Utilización de la fracción fina de la antracita como agente reductor del horno Selas. *Archivo NicaroTec*.
- Unidad de Proyecto de Nicaro. (2016). *Utilización de petcoke como aditivo en la reducción a escala de Laboratorio y Piloto*.
- [www.EcuRed.cu](http://www.EcuRed.cu). (2018).

## ANEXOS

### Anexo 1 Extractable de níquel y cobalto en el mes de mayo de 2018

Días	Extrac Ni	Extract Co	fuel-oil t/d	t/d de mineral	Fuel en TR %	t/h mineral
1	73.981	45.664	207.602	5648.381	2.636	235.349
2	72.201	42.063	201.375	6476.15	2.294	269.840
3	72.46	49.753	181.602	6381.773	2.64	265.907
4	72.466	45.611	152.103	6105.528	2.646	254.397
5	70.189	44.452	152.091	6185.806	2.569	257.742
6	75.958	48.8	140.698	5756.015	3.021	239.834
7	74.514	46.334	174.635	5548.626	2.944	231.193
8	73.015	50.029	199.223	5669.341	2.553	236.223
9	74.833	39.673	197.829	4923.151	2.392	205.131
10	69.083	31.003	181.516	5708.649	2.515	237.860
11	70.568	37.421	219.673	5798.762	2.437	241.615
12	71.797	41.733	237.281	5844.193	2.781	243.508
13	68.108	40.178	239.637	5869.266	2.768	244.553
14	73.001	49.165	180.443	5869.196	2.662	244.550
15	75.757	50.625	140.808	5736.545	2.623	239.023
16	76.542	53.806	153.484	5854.182	2.595	243.924
17	72.973	46.936	137.445	5331.334	2.505	222.139
18	67.378	38.185	154.977	6073.74	2.621	253.073
19	70.197	42.884	145.846	5487.69	2.681	228.654
20	67.25	37.771	108.116	5819.309	2.869	242.471
21	65.236	35.878	158.726	6266.545	2.464	261.106
22	70.514	40.555	162.024	6513.274	2.642	271.386
23	75.446	52.118	178.556	5624.382	2.595	234.349
24	77.968	53.907	207.103	5671.889	2.297	236.329
25	75.718	51.393	186.821	5761.486	1.847	240.062
26	78.904	52.307	201.675	6091.258	2.504	253.802
27	74.879	39.224	177.399	6417.656	2.749	267.402
28	73.714	42.691	190.031	6444.928	2.542	268.539
29	77.24	42.118	211.678	6267.99	2.286	261.166
30	75.482	46.182	184.132	6052.897	2.682	252.204
31	79.153	53.075	192.041	6028.469	2.962	251.186