

Uso del carbón bituminoso como aditivo en el proceso de reducción de lateritas

Use of bituminous coal as an additive in the lateritas reduction process



<http://opn.to/a/KOrOq>

Hugo Javier Angulo-Palma ^{1*}, Angel Legrá-Legrá ¹, Carlos Hernández-Pedrerera ²,
Alisa Lamorú-Urgellés ¹, Junior Ramón Vega-Cala ¹

RESUMEN: Producto a la necesidad que tiene Cuba de extraer el níquel y el cobalto presente en los minerales lateríticos del municipio de Moa en la provincia de Holguín a partir del proceso metalúrgico conocido como Tecnología Caron, logrando disminuir sus costos de producción y aumentando o manteniendo la eficiencia de extracción, se investigó el efecto que tiene la sustitución del petróleo utilizado como aditivo en los Hornos de Reducción del tipo Herreshoff por carbón bituminoso a escala de banco. Se comprobó, empleando un horno de botella para reducir el mineral y un banco de reactores para lixiviar la pulpa amoniacal, que al utilizar a partir de un 4 % de carbón bituminoso se logra sustituir al petróleo sin que se afecten las extracciones de níquel y cobalto. La sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso fue preliminarmente factible desde el punto de vista económico, ahorrándose alrededor de 23,55 millones de USD/ al utilizar un 4 % de carbón bituminoso, y de 52,91 millones de USD/ al emplear un 5 % de carbón bituminoso.

Palabras claves: Aditivos en hornos de reducción, petróleo y carbón bituminoso, extracciones de níquel y cobalto, ahorro económico.

ABSTRACT: Due to the urgent need that Cuba has to extract the nickel and cobalt present in the lateritic minerals of Moa municipality in Holguin province from the metallurgical process known as Caron Technology, managing to reduce their production costs and increasing or maintaining the extraction efficiency, the effect of substitution of oil used as an additive in the Herreshoff type reduction furnaces by bank-level bituminous coal was investigated. In it was proved, that using a bottle furnace to reduce the mineral and a bank of reactors to leach the ammonia pulp, that when using from 4 % of bituminous coal it is possible to replace the oil without affecting the nickel and cobalt extractions. The replacement of additive oil with bituminous coal was preliminarily feasible from the economic point of view, saving around 23,55 millions USD/and using 4 % bituminous coal, and 52,91 millions USD/and using 5 % bituminous coal.

Keywords: Additives in reduction ovens, oil and bituminous coal, nickel and cobalt extractions, economic savings.

Recibido: 27/07/2018

Aprobado en su forma original: 10/09/2019

¹Centro de Investigaciones del Níquel, Moa, Holguín, Cuba

²Universidad de Oriente, Facultad de Ingeniería Química y Agronomía, Santiago de Cuba, Cuba

*Autor para correspondencia: *Hugo Javier Angulo-Palma*. E-mail: hugo@cil.moa.minem.cu

INTRODUCCIÓN

El equipo fundamental utilizado para reducir el mineral laterítico en forma de óxido en la tecnología Caron es conocido con el nombre Horno de Reducción del tipo "Nichols-Herreshoff". ([Habashi, 1997](#); [Tsvetmetpromexport, 1978](#)). Estos se caracterizan por tener 17 hogares enumerados de arriba hacia abajo desde el 0 hasta el 16, encerrados en un cilindro metálico, revestido interiormente por un material refractario, donde el mineral es introducido desde el hogar 0 y comienza a descender a medida que se pone en contacto con los gases reductores a contracorriente, lográndose que el mineral se seque, caliente y reduzca adecuadamente. Con este fin, el horno tiene cámaras de combustión que generan calor y enriquecen la atmósfera reductora, logrando en su interior que ocurran reacciones que garantizan temperaturas de 1 350 a 1 420 °C. Junto con el mineral se introduce directamente petróleo, en proporción de 2,5 % en peso, siendo esta última la fuente fundamental que aporta la atmósfera reductora rica en CO e H₂. ([Chang et al, 2014](#); [Arias, 2013](#)).

Se demostró que este tipo de hornos se corresponde al modelo de flujo no ideal con un tiempo de residencia que oscila de 70 a 77 minutos, donde en los primeros hogares (H-0/H-4) el mineral sufre un proceso de deshidratación y calentamiento, siguiéndole una zona de transición (comprendida entre los hogares 5 y 9), mientras que la reducción fuerte comienza en el hogar 10. ([Angulo et al, 2017](#))

Las investigaciones realizadas en la tecnología Caron muestran que la planta de Hornos de Reducción consume el 14 % de toda la energía demandada por la tecnología carbonato-amoniaco, siendo el petróleo tecnológico un elemento determinante en este aspecto, por lo que cualquier acción que conlleve a disminuir su consumo incitará a la disminución de los costos de producción. ([Coello, 2015](#))

En el contexto actual del mercado, el precio del petróleo tiene la tendencia al incremento en

más de 450 USD/t; por lo que los productores están obligados al incremento de eficiencia o disminución de los costos de producción, por lo que una de las alternativas que puede permitir la disminución de esta variable es la de sustituir el petróleo tecnológico utilizado en los Hornos de Reducción como aditivo por el carbón bituminoso, basado en la diferencia de precios que existe entre cada uno de estos combustibles. ([Datos Macro, 2018](#); [Index Mundi, 2018](#))

Partiendo de esto se propone la siguiente investigación que tiene como objetivo general determinar el efecto que tiene la sustitución del petróleo tecnológico utilizado como aditivo en el proceso de reducción del mineral laterítico por el carbón bituminoso, en las extracciones de níquel y cobalto a escala de laboratorio.

MATERIALES Y MÉTODOS

Esta investigación se realizó en las instalaciones para reducir y lixiviar el mineral laterítico del Centro de Investigaciones del Níquel, Capitán Alberto Fernández Montes de Oca (CEDINIQ). Los resultados obtenidos en ella fueron procesados con la ayuda del software STATGRAPHICS Centurión XV y el Microsoft Excel, para la realización de los gráficos y el análisis de los resultados logrados, utilizando los siguientes materiales y métodos:

Materiales Utilizados

1. Mineral laterítico: El mineral laterítico utilizado en esta investigación corresponde a los minerales que existen en los yacimientos Camarioca Este, Yagrumaje Norte y Yagrumaje Sur en la zona norte de la provincia de Holguín en una proporción de 47,53; 36,72 y 15,74 % másico respectivamente. Este formaba parte de una muestra tecnológica previamente homogenizada, secada y triturada de acuerdo a los requerimientos exigidos por la empresa (grado de homogenización mayor que el 80 %, humedad menor igual a 5,0 % y un tamaño de partícula menor que 50 mm. En la [tabla 1](#) se muestra la composición química promedio de los elementos fundamentales presentes en el mismo.

Tabla 1. Composición química de los elementos fundamentales del mineral laterítico utilizado

Elementos	Ni	Co	Fe	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃
(% en masa)	1,153	0,102	42,113	4,442	7,822	8,580

2. Petróleo tecnológico: El petróleo tecnológico que se empleó para realizar los experimentos presenta características similares, al utilizado en los hornos de reducción de la empresa ECG. En la [tabla 2](#) se muestra sus características principales.

3. Licor carbonato amoniacal fuerte: Se caracteriza por ser incoloro, siendo muy tóxico al ponerse en contacto con las mucosas presentes en el ser humano. Este se caracteriza por tener una densidad que oscila entre 1,02 y 1,03 t/m³. En la [tabla 3](#) se presentan sus características más importantes.

4. Carbón bituminoso: El carbón bituminoso utilizado en la investigación fue obtenido en la Unidad de Proyectos de Nicaro perteneciente al Centro de Investigaciones del Níquel con una humedad y granulometría similar a la que presentaba el mineral laterítico. La misma corresponde a las muestras que fueron utilizadas en las pruebas de banco para el Proyecto

Ferroníquel, mostrándose sus características principales en la [tabla 4](#).

Técnica analítica utilizada

En esta investigación se utilizó la técnica de absorción atómica con el objetivo de determinar el contenido de los elementos químicos presentes en las muestras, ya que permite determinar con una alta confiabilidad, los contenidos de los siguientes elementos: hierro, níquel, cobalto, magnesio, y otros metales.

Características de los equipos utilizados

1. Horno mufla, ([figura 1](#)). El horno mufla utilizado en esta investigación es de procedencia alemana, con un rango de temperatura de 30 a 1200 °C. El motor que tiene acoplado tiene una potencia de 2,8 kW, una tensión de 220 V y una frecuencia de 60 Hz. El peso del equipo es de 30 kg, y su cámara interior posee un revestimiento por óxido de silicio. Sus principales dimensiones se muestran en la [tabla 5](#).

Tabla 2. Características fundamentales del petróleo tecnológico utilizado

Índices	Unidad	Método Analítico	Certificación Lab. Químico
Punto Inflamación	(°C)	D-93	122,50
Carbón Conradson	(%)	D-189	8,60
Cenizas	(%)	D-382	0,06
Agua	(%)	D-95	2,00
Azufre	(%)	D-197	3,09
Asfaltenos	(%)	D-1548	5,89
Valor Calórico	(kcal/kg)	D-4698	9938,74

Tabla 3. Principales características del licor carbonato amoniacal fuerte

Compuestos (% másico)	Propiedades	Unidad	Rango
NH ₃	Temperatura	°C	30,0-40,0
CO ₂	pH	-	8,0-9,0
H ₂ O	Viscosidad	cP	~1,0-1,1

Tabla 4. Características fundamentales del carbón bituminoso utilizado

Parámetro	U/M	Valor
Carbono total	(%)	73,00
Carbono fijo	(%)	52,13
Ceniza	(%)	9,35
Humedad	(%)	5,56
Azufre	(%)	0,58
Materia volátil	(%)	37,72
Densidad	(t/m ³)	0,91
Capacidad calorífica*	(MJ/kg)	28,00

2. Reactor de Lixiviación, (figura 2). Los reactores utilizados para lixiviar se caracterizan por tener una capacidad de cuatro litros y un alto de 241 mm. A estos se le acopla un sistema de agitación mecánica con velocidad de rotación en el rango de 400 rpm a 460 rpm.

Metodología utilizada

- Reducción del mineral laterítico en el horno de botella a escala de banco.
1. Moler el mineral laterítico y el carbón bituminoso homogenizados que se utilizaran para realizar los experimentos hasta que presenten una granulometría de 0,074 mm para un porcentaje del 86 a 88 % de todo el material.
 2. Introducir y mezclar 145,0 g de la mezcla a reducir, según las proporciones establecidas, con 2,9 g de petróleo (combustible que simula el efecto de las cámaras en los hornos de

reducción) en las botellas del horno de reducción a escala de banco.

3. Conectar la mufla y prefijar la temperatura a 250 oC.
4. Introducir las dos botellas con la mezcla descrita en el paso 2 en la estufa con temperatura de 250 oC durante cinco minutos, comenzando a poner en operación, en este momento, el mecanismo motriz y a tomar las lecturas de temperaturas a intervalos de 5 minutos.
5. Prefijar la temperatura de la mufla a 800 oC, y comenzar a aumentar la temperatura hasta llegar a 550 oC, en que se procede a desconectar una resistencia. Al llegar la temperatura de las botellas a 750 oC, se desconecta la otra resistencia y se apaga el mecanismo motriz.

Tabla 5. Dimensiones del Horno mufla

Cámaras	Largo (mm)	Alto (mm)	Ancho (mm)
Interior	300	95	550
Exterior	550	350	550



Figura 1. Imagen del horno mufla utilizado.



Figura 2. Banco de reactores utilizados para lixiviar.

6. Sacar las botellas de la mufla añadiendo argón a razón de 5 L/minutos, para llevar a cabo el proceso de desacople de las botellas de la mufla y el mecanismo de transmisión.
7. Sacar las botellas de la mufla e introducir en la cesta durante 20 minutos sin interrumpir la adición del gas inerte.
8. Añadir agua corriente para su enfriamiento durante 2 horas.
- Lixiviación y lavado del mineral reducido a escala de banco.
1. Tomar un recipiente de 250 mL, purgándolo con Argón.
2. Añadir al recipiente purgado 200 mL de una solución carbonato amoniacal con una concentración de amoníaco en el rango de 80 a 85 g/L.
3. Pesar una masa de mineral resultante de la metodología anterior de 70 a 80 gramos para añadirla al recipiente de 250 mL, dejando suficiente muestra de mineral reducido para realizar los análisis de metálicos.
4. Introducir la mezcla formada en el paso 3 al reactor de lixiviación, agregándole el resto del licor con concentración de amoníaco de 80 a 83 g/L hasta llevarlo a una relación líquido/sólido de 10 a 1.
5. Agitar la mezcla con relación líquido/sólido de 10 a 1 durante dos horas.
6. Filtrar al vacío la mezcla agitada con relación líquido/sólido de 10 a 1, lavándola con 200 mL de soluciones carbonato amoniacales al 7 y 3 % y con agua destilada respectivamente.
7. Secar el sólido filtrado en la estufa a 150 °C durante un tiempo de dos horas.
8. Enfriar el sólido seco hasta que alcance la temperatura ambiente.
9. Triturar el sólido a temperatura ambiente hasta que toda la muestra presente una granulometría menor de 0,150 mm.
10. Envasar en cartuchos previamente codificados la muestra tamizada.
11. Determinar las extracciones de los elementos de interés a partir de la [ecuación 1](#).

$$\% \text{Met}_{ext} = \left[1 - \left(\left(\frac{\text{Met}_{min\ lix}}{\text{Met}_{alim}} \right) * \left(\frac{\text{Fe}_{alim}}{\text{Fe}_{min\ lix}} \right) \right) \right] \quad (1)$$

Donde:

% Met_{ext} es el % de extractable del metal bajo análisis (Ni o Co).

Met_{min lix} es el % del contenido del metal bajo análisis (Ni o Co) en el mineral luego del proceso de lixiviación

Met_{alim} es el % del contenido del elemento analizado (Ni o Co) en el mineral que se alimenta a los hornos de reducción.

Fe_{alim} es el % del contenido de hierro presente el mineral que se alimenta a los hornos de reducción.

Fe_{min lix} es el % del contenido de hierro presente en el mineral luego del proceso de lixiviación.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Comportamiento del calentamiento de las botellas con los experimentos

En la [figura 3](#) se muestra el comportamiento promedio presentado por el calentamiento de cada uno de los experimentos en función del tiempo. A juzgar por el comportamiento presentado para cada uno de ellos, se puede llegar a la conclusión de que todos los experimentos se realizaron manteniendo un perfil térmico similar. En ella se puede apreciar como en ellos se cumplieron los parámetros exigidos por este tipo de reactor ([Angulo et al, 2017](#)), manteniendo el aumento gradual de la temperatura, con un tiempo de residencia que osciló en el rango de 71 a 74 minutos.

Efecto de sustituir el petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de reducción química

En las [figuras 4](#) y [5](#) se ilustra el efecto que tiene la sustitución del petróleo por el carbón bituminoso en el comportamiento de las extracciones de Ni y Co respectivamente. En ellas se puede observar como a medida que aumenta el porcentaje del carbón bituminoso tienden a incrementarse los extractables de Ni y Co.

Por el comportamiento presentado en los extractables del Ni, en la [figura 4](#), se puede llegar a la conclusión de que adicionando un 4 % de carbón bituminoso como aditivo en los hornos de

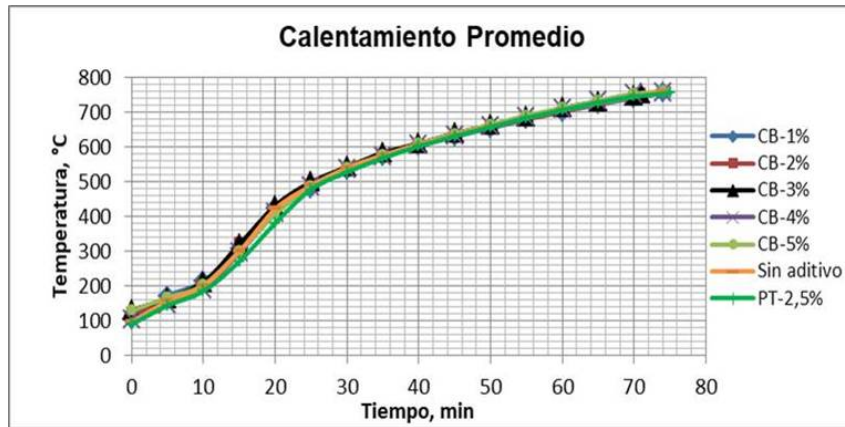


Figura 3. Comportamiento del calentamiento promedio de cada experimento.

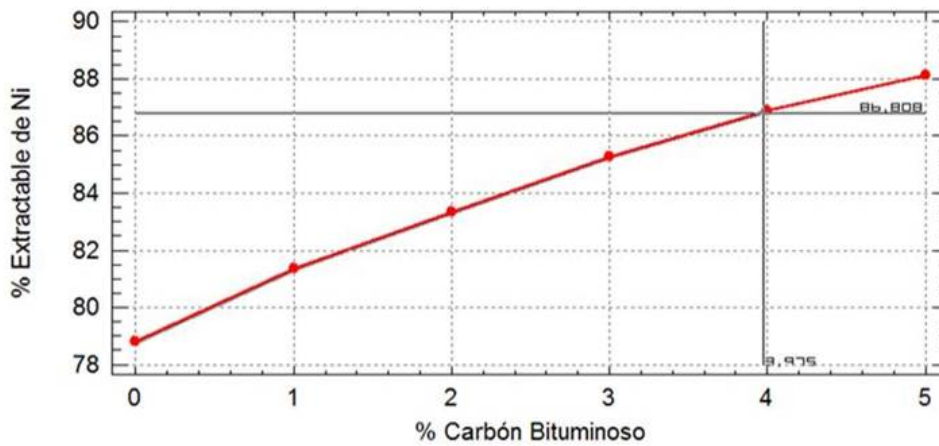


Figura 4. Efecto en las extracciones del Ni de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso.

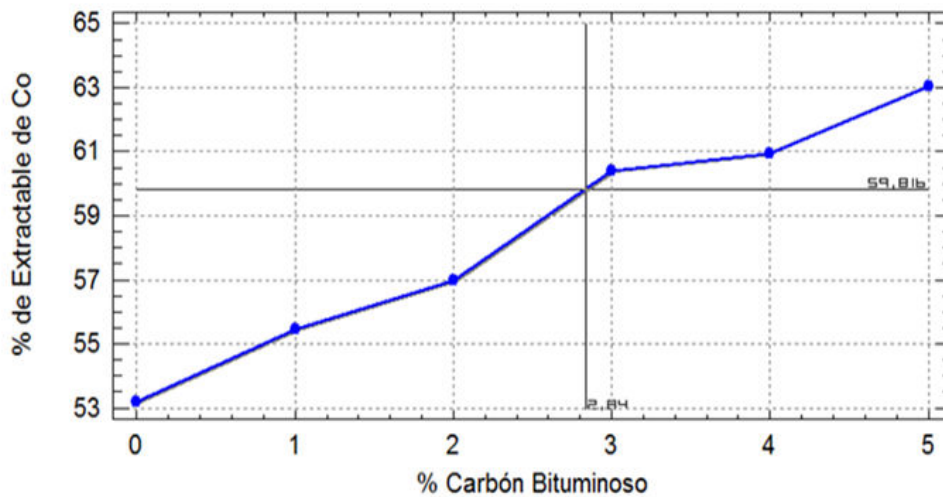


Figura 5. Efecto en las extracciones del Co de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso.

reducción es posible sustituir la relación de mezcla de petróleo tecnológico y mineral laterítico utilizado en la industria (punto localizado en la [figura 4](#)).

Se puede sustituir la cantidad de petróleo tecnológico utilizado como aditivo en la ECG, logrando un ligero incremento del mismo.

En el caso del comportamiento presentado por el extractable del Co, [figura 5](#), se puede concluir que utilizando un 3 % de carbón bituminoso se

Evaluación económica preliminar de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso

La evaluación económica preliminar de la sustitución del petróleo por el carbón se realiza a partir de los resultados obtenidos, teniendo en cuenta las consideraciones correspondientes a los datos de diseño de la ECG. [16] A continuación, se resumen las consideraciones fundamentales:

- Flujo de mineral a procesar: 3 626 640 t/a.
- Cantidad petróleo utilizado como aditivo: 90 666 t/a.
- Cantidad de carbón bituminoso utilizado como aditivo en proporción de 4,0 %; y 5,0 %: 145 066 y 181 332 t/a respectivamente.
- Factor de contracción para el mineral reducido: 0,86
- Flujo de mineral reducido (F_{MR}): 3 118 910 t/a.
- Ley de Ni en el mineral (%Ni): 1,17 % másico.
- Ley de Co en el mineral (%Co): 0,11 % másico.
- Extractable de Ni y Co (% Ext._{Ni} y % Ext._{Co}): Depende de los resultados obtenidos en cada experimento.
- Flujo de Ni a lixiviar (F_{NiL}): $F_{NiL} = F_{MR} * \% Ni * \% Ext_{Ni}$ t/a.
- Flujo de Co a lixiviar (F_{CoL}): $F_{CoL} = F_{MR} * \% Co * \% Ext_{Co}$ t/a.
- Extracción del Ni en la planta de Lixiviación y Lavado (Ext. Ni_{LXL}): 96 %

- Extracción del Co en la planta de Lixiviación y Lavado (Ext. Co_{LXL}): 70 %
- Extracciones del Ni y Co en la planta de Calcinación y Sinter (Ext. Met_{CS}): 99 %
- Cantidad de Ni producido (Ni_{Producido}): t/a.
 $Ni_{producido} = F_{NiL} * Ext_{Ni} + Ni_{LXL} * Ext_{Ni}$
- Cantidad de Co producido: t/a.
 $Co_{producido} = F_{CoL} * Ext_{Co} + Co_{LXL} * Ext_{Co}$
- Precio del Ni en el mercado: 11 234 USD/t.
- Precio del Co en el mercado: 64 342 USD/t.
- Costo del carbón bituminoso: 79,20 USD/t.
- Costo del petróleo tecnológico: 360,40 USD/t.

En la [tabla 6](#) se muestra los resultados de la evaluación económica preliminar para las relaciones de mezclas que brindaron los mejores resultados: 4,0 y 5,0 % de carbón bituminoso, y para la mezcla con petróleo utilizada por la industria.

En ella se puede apreciar como por concepto de cambiar el tipo de aditivo en el horno de reducción se pueden ahorrar alrededor de 21,19 millones de USD al año al utilizar un 4 % de carbón, y de aproximadamente 18,31 millones de USD al año al utilizar un 5 % de carbón como aditivo.

Por los resultados obtenidos se puede llegar a la conclusión de que la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en cantidades del 4 % o 5 % en peso es pre-factible desde el punto de vista económico. De acuerdo a los resultados logrados se puede afirmar que con la sustitución se logran ahorrar por concepto del aumento del %

Tabla 6. Evaluación económica preliminar

Mezcla	PT-2,5% + Mineral	CB 4% + Mineral	CB 5% + Mineral
Ni _{Producido} , t/a	30 107	30 138	30 565
Co _{Producido} , t/a	1 442	1 449	1 499
Venta _{Ni} , USD/a	338 220 061	338 570 710	343 362 907
Venta _{Co} , USD/a	1 937 133 272	1 939 141 588	1 966 588 587
Aditivo, t/a	90 666	145 066	181 332
Costo _{aditivo} , USD/a	32 676 026	11 489 196	14 361 494
Ganancia*, USD/a	2 242 677 306	2 266 223 103	2 295 590 000
Incremento **, USD/a	-	23 545 796	52 912 693

*Ganancia=Venta-Costo ** Incremento=Ganancia_{mezcla con CB} - Ganancia_{mezcla con PT}

de extractable Ni y Co, alrededor de 2,36 millones USD/a al utilizar un 4 % de carbón bituminoso y 34,60 millones de USD/a al utilizar un 5 % de carbón bituminoso.

CONCLUSIONES

1. Utilizando un porcentaje de 4 % de carbón bituminoso se logra sustituir el petróleo tecnológico utilizado como aditivo.
2. La sustitución del petróleo tecnológico por el carbón bituminoso en el proceso de reducción es pre-factible económicamente, logrando ahorrar alrededor de 21,19 millones USD/a al utilizar un 4% de carbón bituminoso y 18,31 millones de USD/a al utilizar un 5% de carbón bituminoso por concepto de diferencia de precios de los aditivos.
3. La sustitución del petróleo tecnológico por el carbón bituminoso logra ahorrar alrededor de 2,36 millones USD/a al utilizar un 4 % de carbón bituminoso y 34,60 millones de USD/a al utilizar un 5 % de carbón bituminoso por concepto del aumento del % de extractable Ni y Co.

NOMENCLATURA

Fe, Ni y Co: Elementos metálicos, hierro, níquel y cobalto respectivamente.

CO: Monóxido de Carbono.

H₂: Hidrógeno.

°C: Unidad de medida de la temperatura.

H-0...16: Número de hogar del horno al que se hace referencia.

USD/t: dólares americanos por tonelada.

USD/a: dólares americanos al año.

t/a: toneladas al año.

mm: Unidad de medida de longitud, milímetros.

BIBLIOGRAFÍA

- Angulo Palma, H. J.; Merencio Guevara, P. L.; Legrá Legrá, A. & Videaux Arcia, L. 2017. "Análisis especiales en un horno de reducción de níquel a escala de Planta Piloto".

Tecnología Química, Vol. XXXVII, (No. 3): 445-460.

Arias Pérez, Henry. 2013. Evaluación de la extracciones de níquel y cobalto en el proceso de reducción cuando solo se muelen las partículas menores de 6.3 mm. Trabajo de Diploma en opción al título de Ingeniero Metalúrgico, Moa: Instituto Superior Minero-Metalúrgico "Dr. Antonio Núñez Jiménez", Facultad de Metalurgia y Electromecánica.

Chang Cardona, A.R.; Rojas, A.L.; & Arce, J. 2014. "Influencia sobre el extractable de níquel de los minerales oxidados del yacimiento Punta Gorda". *Minería & Geología*, Vol. XXX, (No. 4): 70-88.

Coello Velázquez, A. L. 2015. "Procedimiento para la determinación de la carga circulante en circuitos cerrados de trituración y molienda". *Minería & Geología*, Vol. XXXI, (No. 2): 66-79.

Datos Macro. Precios del petróleo tecnológico. Available: Available: <https://www.datosmacro.com/materias-primas/opec> . [Consulted: January 1, 2018].

Habashi, F. 1997. Handbook of Extractive Metallurgy. Vol. II. 1997: WILEY- VCH, 791 p.

Index Mundi. Precios del carbón bituminoso. Available: Available: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=carbon-colombiano> . [Consulted: January 1, 2018].

Tsvetmetpromexport. 1978. Fábrica Metalúrgica Las Camariocas República de Cuba. Proyecto Técnico. Documento Inédito. Volumen III: Tecnología. Libro I Memoria Descriptiva. Instituto de Proyectos e Investigaciones Científicas: Gipro níquel, 189p.

Los autores de este trabajo declaran no presentar conflicto de intereses.

Este artículo se encuentra bajo licencia [Creative Commons Reconocimiento-NoComercial 4.0 Internacional \(CC BY-NC 4.0\)](https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/)