

## **Reducción de menas lateríticas utilizando como aditivo mezclas de carbón bituminoso y petróleo**

Reduction of lateritic minerals using additive mixtures of bituminous coal and oil

MSc. Hugo Javier Angulo-Palma<sup>1\*</sup>

Ing. Angel Legrá-Legrá.<sup>1</sup>

DrC. Carlos Hernández-Pedraza<sup>2</sup>

Ing. Alisa Lamorú-Urgellés<sup>1</sup>

MSc. Norman Toro-Villarroel<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Centro de Investigaciones del Níquel. Holguín. Cuba.

<sup>2</sup>Universidad de Oriente. Santiago de Cuba. Cuba

<sup>3</sup>Universidad Católica del Norte. Chile

\*Autor para la correspondencia. Correo electrónico: hangulo@cil.moa.minem.cu

### **RESUMEN**

Durante la investigación se evaluaron tres aditivos en el proceso de reducción de los hornos del tipo Herreshoff formados por mezclas de petróleo tecnológico y carbón bituminoso, tomando como referencia las extracciones de Ni y Co logradas al utilizar como aditivo al petróleo tecnológico al 2,50 % y al carbón bituminoso al 5,00 %. Los experimentos se realizaron a escala de laboratorio, a partir de un horno de botella para reducir el mineral laterítico y un banco de reactores para lixiviar la pulpa formada por el mineral reducido y el licor carbonato amoniacal. Se pudo comprobar que la mezcla que garantizó las extracciones de Ni y Co más elevadas fue la que utilizó 2,00 % de carbón bituminoso y 1,25 % de petróleo tecnológico. A partir del estudio se demostró que es posible sustituir parcialmente al petróleo tecnológico utilizado como aditivo en los hornos de reducción por la

mezcla aditiva, ahorrándose alrededor 15 524 957,77 USD/a por concepto de diferencias de precios que existen entre el petróleo y el carbón bituminoso.

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

## **ABSTRACT**

During the investigation, three additives were evaluated in the process of reduction of the Herreshoff type furnaces formed by mixtures of technological oil and bituminous coal, taking as reference the extractions of Ni and Co achieved by using 2,50 % technological oil as an additive and to bituminous coal at 5,00 %. The experiments were carried out on a laboratory scale, from a bottle furnace to reduce the laterite ore and a bank of reactors to leach the pulp formed by the reduced ore and the ammonia carbonate liquor. It was found that the mixture that guaranteed the highest Ni and Co extractions was the one that used 2,00 % bituminous coal and 1,25 % technological oil. From the study it was shown that it is possible to partially replace the technological oil used additive in the reduction furnaces by the additive mixture, saving around 15 524 957.77 USD / a due to price differences that exist between oil and coal bituminous.

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

Recibido: 19/3/2019

Aceptado: 20/7/2019

## **Introducción**

Los hornos de reducción del tipo "Nichols-Herreshoff " son los equipos utilizados por la Tecnología Caron para reducir químicamente las menas lateríticas con el objetivo de extraer su contenido de níquel (Ni) y cobalto (Co), aprovechando la gran selectividad que tiene el licor carbonato amoniacal al ponerse en contacto

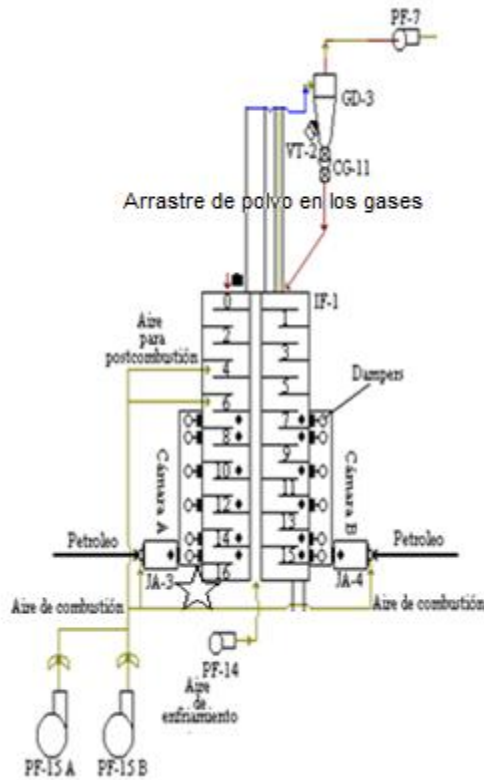
con las lateritas reducidas.<sup>(1, 2)</sup>

Estos utilizan una elevada cantidad de petróleo para sus operaciones, por lo que habitualmente los procesos metalúrgicos que lo contemplan, dentro de su esquema tecnológico, se caracterizan por presentar un alto costo por concepto del consumo de energía.<sup>(3, 4)</sup>

Una de las alternativas que permiten reducir el costo debido al consumo de combustible lo constituye la sustitución del petróleo tecnológico (PT), empleado como aditivo en estos hornos, por el carbón bituminoso (CB) basándose en la diferencia de precios que presentan estos recursos en el mercado internacional.<sup>(5, 6)</sup>

En trabajos anteriores investigadores del Centro de Investigaciones del Níquel: Capitán Alberto Fernández Montes de Oca (CEDINIQ) determinaron el efecto que tiene la sustitución de estos aditivos en los procesos de reducción química y molienda de los minerales lateríticos a escala de laboratorio.<sup>(7,8,9)</sup>

La sustitución, a pesar de garantizar que se mantuvieran los índices de eficiencia metalúrgica y de ser factible preliminarmente desde el punto de vista económico, presentaba la dificultad de no modelar el efecto provocado por la postcombustión<sup>(10)</sup> y los arrastres de polvo que existen habitualmente en estos equipos, ver figura 1.



**Fig. 1-** Horno de reducción a escala de planta piloto

Es conocido que los hornos de reducción se diseñaron para tener un porcentaje de arrastre de polvo que oscila entre el 8 y el 13 %, considerando como referencia al mineral alimentado al equipo en base seca. <sup>(11)</sup> Esto trae como consecuencia que haya que adicionar una mayor masa del carbón bituminoso para lograr que en el interior del horno exista la proporción que permita sustituir al petróleo tecnológico. Este aumento es provocado debido a que el carbón experimenta la misma afectación que el mineral laterítico, previamente secado y molido, por tener una menor densidad y una granulometría similar. Al realizar este incremento de masa se disminuye la productividad de los hornos, corriéndose el riesgo de que los gastos del proceso aumenten y que no sea posible la sustitución total del petróleo tecnológico.

Estos factores, que se encuentran presentes en los hornos a escala piloto e industrial, dan lugar a que se analice la posibilidad de sustituir parcialmente al petróleo tecnológico por el carbón bituminoso.

De acuerdo a lo antes planteado, se realiza este estudio que tiene como objetivo general evaluar la sustitución parcial del petróleo tecnológico, utilizado como aditivo en los hornos de reducción, por el carbón bituminoso a partir de tres mezclas formuladas por estos recursos energéticos.

## Materiales y Métodos

La investigación se realizó en las instalaciones del Centro de Investigaciones del Níquel, Capitán Alberto Fernández Montes de Oca para reducir y lixiviar el mineral laterítico con las diferentes mezclas de reductores (petróleo y carbón bituminoso). Los resultados 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.

### Materiales

Los principales materiales utilizados fueron la mena laterítica, el petróleo tecnológico, el carbón bituminoso y el licor carbonato amoniacal.

Las lateritas utilizadas corresponden a las menas 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. Formaba parte de una muestra tecnológica previamente homogenizada, secada y triturada con el objetivo de lograr un grado de homogenización mayor del 80 %, una humedad menor o igual que el 5,0 % y un tamaño de partícula inferior a los 50 mm. En la tabla 1 se muestra la composición química promedio de los elementos fundamentales presentes en la misma.

**Tabla 1-** Composición química de los elementos fundamentales de la mena laterítica

Elementos	NiO	CoO	FeO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
% en masa	1,153	0,102	42,113	4,442	7,822	8,580

El petróleo tecnológico y el carbón bituminoso que se emplearon para realizar los experimentos presentan características similares al utilizado por Angulo.<sup>(7, 9)</sup>

El licor carbonato amoniacal fuerte tiene una densidad que oscila entre 1,02 y 1,03

t/m<sup>3</sup>. En la tabla 2 se presentan sus características más importantes.

**Tabla 2-** Principales características del licor carbonato amoniacal fuerte

Compuestos	% másico	Propiedades	Unidad	Rango
NH <sub>3</sub>	13,0-14,0	Temperatura	°C	30,0 - 40,0
CO <sub>2</sub>	6,0-7,0	pH	-	8,0 - 9,0
H <sub>2</sub> O	79,0-81,0	Viscosidad	cP	~1,0 - 1,1

### Equipos

Los equipos que se utilizaron durante la investigación fueron el horno mufla y los reactores utilizados para lixiviar. La referencia bibliográfica <sup>(7)</sup> se presentan sus principales características.

### Mezclas de aditivos formuladas

En la tabla 3 se muestran las tres mezclas de petróleo tecnológico y carbón bituminoso utilizadas como aditivo en el proceso de reducción en esta investigación. Las mezclas tienen como terminología CB12-PT17,50, CB16-PT15,00, y CB20-PT12,50; donde los valores que acompañan a los términos CB y PT corresponden a los kg por toneladas de mineral laterítico, tomando como referencia a las lateritas procesadas en base seca.

**Tabla 3-** Mezclas de carbón bituminoso y petróleo utilizadas como aditivos

Nº	Mezclas	CB (kg / tonelada)	PT (kg / tonelada)
1	CB12-PT17,50	12,00	17,50
2	CB16-PT15,00	16,00	15,00
3	CB20-PT12,50	20,00	12,50
4	PT-25	0,00	25,00
5	CB-50	50,00	0,00

### Metodologías

Para realizar la experimentación se emplearon dos metodologías: Reducción del mineral laterítico en el horno de botella y Lixiviación y lavado del mineral reducido a escala de laboratorio.<sup>(7)</sup> Estas perseguían como objetivo determinar las

extracciones de los elementos de interés, Ni y Co, a partir del cálculo del extractable por la ecuación 1.

$$\% Met_{ext} = \left[ 1 - \left( \left( \frac{Met_{min\ lix}}{Met_{alim}} \right) * \left( \frac{Fe_{alim}}{Fe_{min\ lix}} \right) \right) \right] * 100 \quad (1)$$

Donde:

% Met<sub>ext</sub> porcentaje de extractable del metal bajo análisis, Ni o Co.

Met<sub>min lix</sub> porcentaje del contenido del metal bajo análisis en la mena, Ni o Co, luego del proceso de lixiviación.

Met<sub>alim</sub> porcentaje del contenido del elemento analizado en la mena que se alimenta a los hornos de reducción, Ni o Co.

Fe<sub>alim</sub> porcentaje del contenido de hierro presente la mena que se alimenta a los hornos de reducción.

Fe<sub>min lix</sub> porcentaje del contenido de hierro presente en el mineral luego del proceso de lixiviación.

### **Técnica analítica**

Se utilizó en la investigación la técnica analítica de absorción atómica con el objetivo de conocer el porcentaje másico de los elementos químicos presentes en las muestras de cada experimento realizado (hierro, níquel, cobalto, magnesio, y otros metales).

## **Resultados y discusión**

### **Calentamiento promedio de las mezclas**

Se puede apreciar, figura 2, que cada uno de los experimentos realizados mantuvo un aumento gradual de la temperatura con un tiempo de residencia que osciló entre los 71 y 74 minutos, corroborando de esta manera las investigaciones realizadas sobre esta temática.<sup>(2, 7, 9)</sup> Al comparar el perfil térmico mostrado en cada una de las mezclas se puede llegar a la conclusión de que todos los experimentos fueron sometidos a un régimen de calentamiento similar, sin presentar desviaciones significativas entre cada uno de ellos.

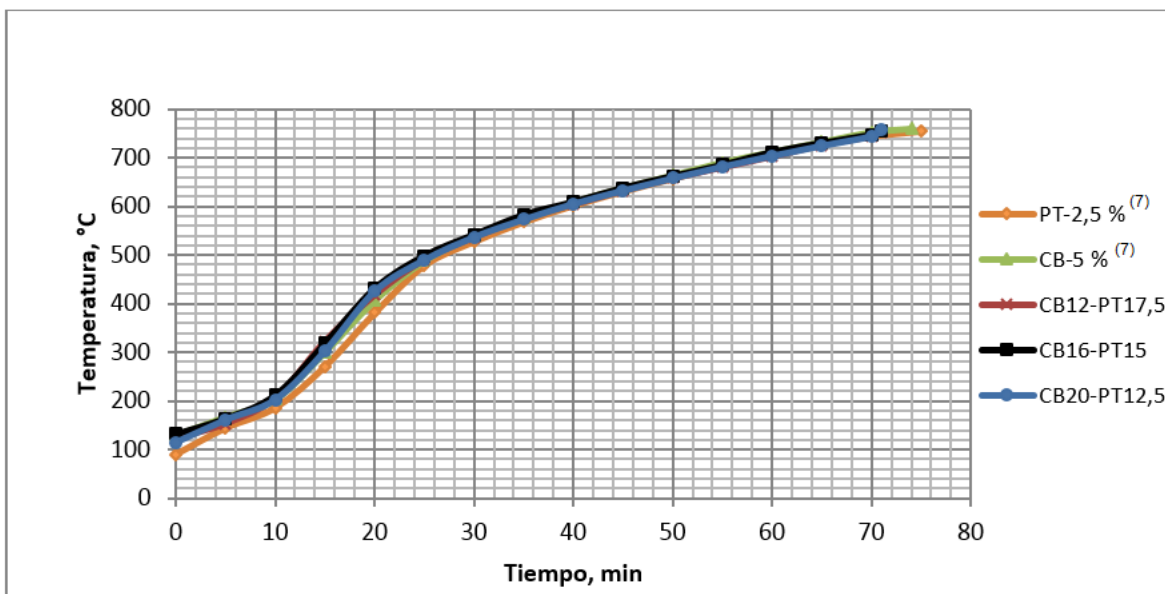


Fig. 2- Comportamiento del calentamiento promedio de cada mezcla.

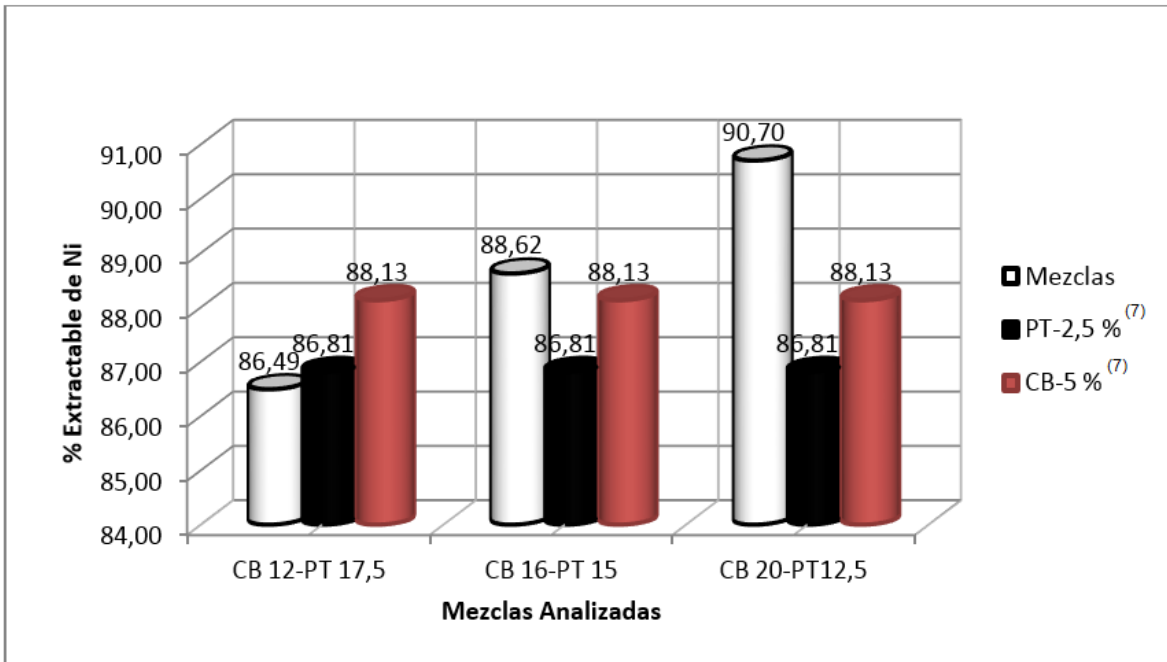
### Evaluación de las mezclas en función del extractable de níquel y cobalto

En la figura 3 se compara el porcentaje de extractable de Ni de cada una de las mezclas de aditivos evaluadas en el proceso de reducción del mineral laterítico. La comparación se realizó tomando como referencia los resultados publicados <sup>(7)</sup>, al utilizar como aditivo al petróleo tecnológico en 2,5 % y al carbón bituminoso en un 5,0 %.

En el caso de utilizar la mezcla CB20-PT12,50 se puede observar que el extractable de Ni se incrementó en más de un 2,57 %, en comparación con los resultados obtenidos con los aditivos utilizados como patrón.

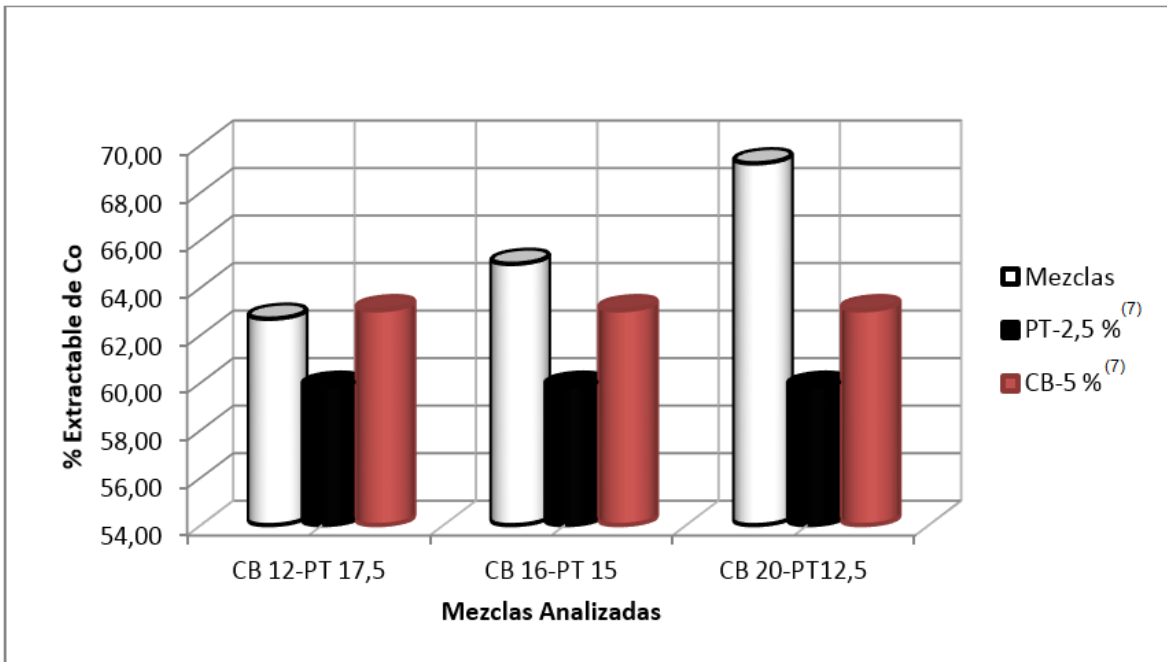
Al analizar la mezcla CB12-PT17,50 y CB16-PT15,00 se observa que los resultados no son satisfactorios ya que las extracciones de Ni, al utilizar la primera mezcla, tienden a disminuir hasta 1,64 %; mientras que en el caso de la segunda mezcla la tendencia es de mantener los extractables de Ni logrados con los aditivos tomados como referencia.





**Fig. 3-** Evaluación de las extracciones del Ni para las mezclas analizadas.

El porcentaje de las extracciones de Co para las mezclas investigadas se muestra en la figura 4. Se puede apreciar que la tendencia que presentó fue similar al obtenido para las extracciones de Ni, logrando los mejores resultados al utilizar como aditivo la mezcla CB20-PT12,50 ya que permite incrementar las extracciones de Co en un porcentaje superior a 9,40.



**Fig. 4-** Evaluación de las extracciones del Co para las mezclas analizadas.

A juzgar por los resultados logrados se puede llegar a la conclusión de que la mezcla de aditivo que presenta el mejor comportamiento en el proceso de reducción es la CB20-PT12,50 pues garantiza obtener extractables de Ni y Co de 90 y 69 % respectivamente.

En la tabla 4 se presenta la evaluación económica preliminar.

**Tabla 4.** Evaluación económica preliminar de los aditivos

Aditivos	PT-2,5 %	CB 5 %	CB20-PT12,50	
			CB	PT
Mineral, t/a	3 626 640			
Aditivos, t/a	90 666	181 332	72 352,80	45 333
Precio de aditivo USD/t <sup>(5, 6)</sup>	495,54	95,91	95,91	495,54
Costo de aditivo, USD/a	44 928 629,64	17 391 552,12	29 403 671,87	

Se observa que al utilizar la mezcla CB20-PT12,5 se pueden ahorrar alrededor de 15 524 957,77 USD/a, al tomar como referencia al PT-2,5 %, por concepto de diferencias de precios que existen entre estos recursos energéticos actualmente.

## Conclusiones

1. Las extracciones de Ni y Co más baja se obtuvieron al utilizar las mezclas de aditivos CB12-PT17,50 y CB16-PT15,00.
2. Al utilizar como aditivo la mezcla CB20-PT12,50 se logra un incremento de la extracción de Ni de más del 2,57 %, tomando como referencia la extracción obtenidas con los aditivos PT-2,5 % y CB-5 %.
3. Al utilizar como aditivo la mezcla CB20-PT12,50 se logra un incremento de la extracción de Co de más del 9,40 %, tomando como referencia las extracciones obtenidas con los aditivos PT-2,5 % y CB-5 %.
4. Al utilizar la mezcla de CB20-PT12,50 como aditivo se logran ahorrar alrededor de 15 524 957,77 USD/a por concepto de diferencias de precios que existen entre el petróleo y el carbón bituminoso, al utilizar como referencia al aditivo PT-2,5 %.

## Nomenclatura

PT y CB: Petróleo tecnológico y carbón bituminoso respectivamente.

CB12-PT17,50: Mezcla de aditivo formada por 12,00 kg de CB y 17,50 kg de PT, por tonelada de mineral laterítico en base seca.

CB16-PT15,00: Mezcla de aditivo formada por 16,00 kg de CB y 15,00 kg de PT, por tonelada de mineral laterítico en base seca.

CB20-PT12,50: Mezcla de aditivo formada por 20,00 kg de CB y 12,50 kg de PT, por tonelada de mineral laterítico en base seca.

PT-2,5 %: Aditivo reductor del horno formado por 2,5 % de PT.

CB-5 %: Aditivo reductor del horno formado por 5,0 % de CB

## Referencias bibliográficas

1. HABASHI, Fathi. *Handbook of Extractive Metallurgy*. II. 1997: WILEY- VCH, pp. 715-791.
2. ANGULO PALMA, Hugo Javier, MERENCIO GUEVARA, Pedro Luis, LEGRÁ LEGRÁ, Angel y VIDEAUX ARCIA, Lilian. ``Análisis especiales en un horno de

reducción de níquel a escala de Planta Piloto''. *Tecnología Química*, 2017: **37**(3), pp. 445-460.

3. RODRÍGUEZ SERRANO, Jorge Luis. ``Manual de operaciones de la UBP Planta Hornos de Reducción''. Informe inédito. Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, 2007.

4. LEGRÁ LEGRÁ, Angel. ``Instrucción del puesto de trabajo para el operador del Horno de Reducción en la Planta Piloto de Moa''. Informe inédito. Centro de Investigaciones del Níquel, Capitán Alberto Fernández Monte de Oca. 2013. Instrucción: UPP- IPT-07.

5. INDEX MUNDI. ``Precios del carbón bituminoso''. 12/09/2018; from: <http://www.indexmundi.com/es/precios-de-mercado/?mercancia=carbon-colombiano>.

6. DATOS MACRO. ``Precios del petróleo tecnológico''. 12/09/2018; from: <https://www.datosmacro.com/materias-primas/opec>.

7. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ LEGRÁ, Angel, HERNÁNDEZ PEDRERA, Carlos y LAMORÚ URGELLÉS, Alisa. ``Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en el proceso de reducción de lateritas''. *Tecnología Química*, 2018: **38**(3), pp. 613-625.

8. ANGULO PALMA, Hugo Javier, LEGRÁ LEGRÁ, Angel, y COELLO VELÁZQUEZ, Alfredo Lázaro. ``Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por el carbón bituminoso en el proceso de molienda de los minerales lateríticos''. *Ciencia e Innovación Tecnológica*, Editorial Académica Universitaria, 2018: Vol. II: Ciencias Técnicas, ISBN: 978-959-7225-34-8, pp. 529-539.

<http://edacunob.ult.edu.cu/handle/123456789/38>

9. ANGULO PALMA, Hugo Javier. ``Efecto de la sustitución del petróleo aditivo por carbón bituminoso en los procesos de reducción y molienda de lateritas''. Tesis presentada en opción al título académico de Máster en Ingeniería de Procesos Químicos. Facultad de Ingeniería Química y Agronomía. Universidad de Oriente. Cuba. 2017.

10. RAMÍREZ MENDOZA, M. ``Modelación del proceso de postcombustión en un horno de reducción de níquel``. *Revista de Metalurgia*, 2002: **38**(2), pp. 150-157.
11. TSVETMETPROMEXPORT. *Fábrica Metalúrgica Las Camariocas República de Cuba. Proyecto Técnico*. Documento Inédito. Volumen III: Tecnología. Libro I Memoria Descriptiva, 1978. Instituto de Proyectos e Investigaciones Científicas Gipro níquel, pp.1-189.

### **Conflicto de intereses**

Los autores declaran que no existen conflictos de interés.