

Desarrollo histórico del proceso de calcinación reductora de los minerales en un Horno tipo *Nichols-Herreshoff*

Historical development of the ores reduction - roasting process in *Nichols-Herreshoff* Multiple Hearth Furnaces

Jorge Miranda López¹ <https://orcid.org/0000-0002-2218-4563>

¹Centro de Investigaciones del Níquel Capitán “Alberto Fernández Montes de Oca” (CEDINIQ).

*Autor para la correspondencia: jmiranda@cil.moa.minem.cu

RESUMEN

El propósito de este artículo fue analizar los antecedentes históricos del desarrollo del horno de hogares múltiples “*Nichols-Herreshoff*”, con el fin de comprender los cambios potenciales y proponer modificaciones que permitan optimizar la extracción de elementos valiosos en la práctica comercial con minerales lateríticos. Su aplicación data desde 1912 para calentar en ocho hogares minerales de hierro y matas sulfurosas. La implementación de los mecanismos raspadores, la circulación de los gases por el centro del horno para el quemado de gases reductores, el diseño de quemadores, y de un número mayor de hogares (hasta 16) enfriados por un eje central con aire en su interior, incrementó el tiempo de retención, el contacto mineral – gases y se intensificaron las reacciones químicas de descomposición térmica. En la actualidad se procesan distintos materiales tales como: sulfuro de zinc, minerales lateritas, antimonio, arsénico, mena de magnetita, entre muchos otros. Se determinó que el procedimiento tecnológico de la postcombustión directa sobre el mineral en los hogares H4 y H6 se introdujo desde 1958 en las industrias productoras de níquel en Cuba, Australia, Filipinas, Brasil, entre otras; aunque se obtuvieron mayores recuperaciones del níquel y cobalto sin este procedimiento, se logró un ahorro sustancial de portadores energéticos. aplicable a todos los tipos de lateritas y sus mezclas.

Palabras clave: *horno nichols herreshoff*; características técnicas; aplicaciones.

ABSTRACT

The purpose of this article was to analyze the historical background of the development of the Nichols-Herreshoff multiple hearth furnace, in order to understand potential changes and propose modifications that could optimize the extraction of valuable elements in commercial practice with laterites ores. Its application dates back to 1912 for calcining iron ore and sulfide mattes in eight hearths. The implementation of scraping mechanisms, the use of gases through the center of the furnace for burning reducing gases, the design of burners and a greater number of hearths (up to 16) cooled by a central shaft with air inside, increased retention time, mineral-gas contact, and intensified thermal decomposition chemical reactions. Currently, various materials are processed, such as zinc sulfide, laterite minerals, antimony, arsenic, and magnetite ore, among many others. It was determined that the technological procedure of direct post-combustion on the mineral in H4 and H6 hearths was introduced since 1958 in the nickel-producing industries of Cuba, Australia, the Philippines, Brazil, among others. Although higher recoveries of nickel and cobalt were achieved without this procedure, substantial savings in energy carriers are achieved. It is recommended to evaluate indirect combustion in order to optimize efficiency rates in the recovery of valuable metals and energy carriers, applicable to all types of laterites and their mixtures.

Keywords: furnace *nichols-herreshoff*, technical characteristics; applications.

Recibido: 05/05/2025

Aceptado: 28/08/2025

Introducción

La pirometalurgia se considera un arte y a la vez una ciencia de la extracción de los metales basado en métodos térmicos, se considera tan antigua como la civilización. El prefijo piro se usa para indicar que un compuesto se obtuvo por calentamiento, además significa fuego, se deriva del griego puros (*Πυρα*).^(1,2)

Desde un principio la aplicación de los procesos pirometalúrgicos, y en la propia dinámica de la interacción hombre-naturaleza, el ser humano fue partícipe de un desarrollo evolutivo alcanzado a través del propio trabajo, especialmente con el diseño de hornos de mezclado mecánico y de hogares

múltiples; pero para llegar a este estado de actualidad, tuvo que aplicar desde un principio técnicas de la tostación muy primitivas que consistían en quemar los minerales en montones o pilas, método lento, difícil de controlar y peligroso a la hora de manipular los minerales calientes, a pesar de esto fue mejorado con el uso de techos sobre la pila del mineral calcinándose en un horno de reverbero primitivo, especialmente las matas sulfurosas.

El surgimiento posterior de varios tipos de hornos con estos fines fue perfeccionado, específicamente, se apreció que, si se agitaba el material de manera que el aire pudiera penetrar dentro de los hornos y ponerse en contacto los gases con los sólidos calientes, mejoraban los índices de tostación. De esta forma se introdujo inicialmente el mezclado manual; sin embargo, el trabajo en estos hornos rudimentarios, seguían siendo desagradables e incómodo por el intenso calor y los gases excesivos que se emanaban a la atmósfera, y además se desperdiciaban tiempo y espacio.

El horno mecánico con eje vertical se desarrolló por el ingeniero francés Henri Perret (1856 – 1939), en Francia ⁽³⁾ y por el ingeniero británico, Sir William MacDougall (1868 – 1938), en Inglaterra ⁽⁴⁾. Además, el primer horno de dos hogares se diseñó por William Parker (1824 – 1899), fue un ingeniero y empresario inglés conocido por sus contribuciones en el campo de la metalurgia y los hornos industriales, es especialmente reconocido por su trabajo en el desarrollo y mejora de hornos de fundición y procesos relacionados. ⁽⁵⁾

Se conocen diversas modificaciones en el diseño en los años comprendidos entre 1851 hasta 1932, por ejemplo en Inglaterra por los inventores: MacDougall William (1868 – 1938), Wedge Utley (1863 - 1948), Mackenzie Duncan (1831-1913); en Alemania, Lurgi Gesellschaft (Compañía fundada en el año 1912), en EE.UU por Frasch Herman (1851 - 1914) y posteriormente el “Herreshoff” desarrollado por John Francis (1850 - 1932). ⁽¹⁾

Un avance significativo, que se expandió principalmente en Norteamérica, fue la contribución específica al desarrollo posterior del horno de hogares múltiples Nichols-Herreshoff. Estas contribuciones se basaron en los mecanismos raspadores y en el uso de aire secundario por el eje central del horno para quemar gases reductores, secar materiales y ahorrar portadores energéticos.

Esto permitió intensificar las transformaciones térmicas a la vez cambios

químico-mineralógicos, mejorar el contacto entre minerales y gases, con ello, optimizar el consumo energético. Sin embargo, no siempre se valoraron las posibles afectaciones para distintas materias primas, como en el caso de las lateritas, donde ocurren transformaciones mineralógicas irreversibles de las fases de hierro. Estas transformaciones pueden dar lugar a la formación oxidativa de espinelas de hierro que atrapan los elementos valiosos, impidiendo su metalización en hogares intermedio o inferiores, dificultando su posterior lixiviación con soluciones carbonato-amoniacales, como sucede específicamente en el proceso Caron.

No obstante, la existencia de un horno en principio semejante al Herreshoff, creado por: Utley Wedge, ingeniero químico estadounidense, trabajó en refinerías de metales y fue inventor del horno tipo “Wedge”, inicialmente se diseñó para fundiciones industriales y posteriormente se adaptó para calefacción residencial. También creó hornos resistentes a ácido para la industria química. Su trabajo abarcó la producción de ácido sulfúrico. ^(6, 7, 8) Utley fue desarrollador en el contexto de la industria cerámica y ladrillera, diseñó un horno que respondió a la necesidad de soluciones más eficientes en los procesos de cocción. Sin embargo, varias compañías han fabricado este tipo de horno, como, por ejemplo “*Rotary Kiln & Dryer Inc.*” y “*Furnace Builders Inc.*”, en los Estados Unidos. ^(9, 10, 11)

En Alemania, la empresa “*Lurgis Gesellschaft*” desarrolló hornos de este tipo en la década de 1920, diseñados para tratar diferentes tipos de sulfuros. El avance en su desarrollo estuvo liderado por el ingeniero y químico Hermann Staudinger, junto con otros colaboradores de la compañía.⁽⁹⁾ En los Estados Unidos, principalmente la “*Chemical Constructions Co.*” realizó varias instalaciones, incluyendo algunas destinadas a la refinación del petróleo y otras para el tratamiento de sulfatos ferrosos. ^(12, 13, 14, 15)

El horno “*Herreshoff*”, que lleva el apellido de su propio diseñador, fue el primer horno con múltiples hogares enfriados por un eje central con aire en su interior. Este horno se utilizó para calentar minerales de hierro y estaba compuesto por ocho hogares. Su éxito fue logrado en 1889 por el Dr. John B. F. Herreshoff, quien en ese momento trabajaba como ingeniero en la “*Nichols Chemical Co.*” El horno se puso en marcha en Laurel Hill, Nueva York, Estados Unidos. ^(3, 6)

El horno “*Herreshoff*”, se solicitó su patente en los Estados Unidos a partir de 1907 y se introdujo en la práctica metalúrgica el 12 de abril de 1912. Posteriormente, en el Reino Unido, se aplicó en 1913. Las especificaciones de su diseño fueron reconocidas en la Oficina de Patentes de EE.UU. patente No. 22.022, otorgada en 1910.

De hecho, dicho horno representaba un gran avance en comparación con los modelos contemporáneos, gracias a su mayor capacidad de calcinación y a su facilidad de manejo, lo que también implicaba un menor requerimiento de mantenimiento.

El propósito de este artículo fue analizar los antecedentes históricos del desarrollo del horno de hogares múltiples, tipo: “*Nichols-Herreshoff*”. Además, se abordaron los antecedentes y el uso del procedimiento de postcombustión directa y su influencia en la reducción de los minerales, especialmente las lateritas que componen las rocas ultrabásica llamada comúnmente ofiolitas.

Materiales y métodos

Se llevó a cabo una revisión exhaustiva de la bibliografía. Para ello, se emplearon métodos teóricos, como el enfoque histórico-deductivo cronológico y el método histórico-lógico, con el fin de contextualizar el objeto de estudio en su marco temporal. Además, se realizó un análisis de documentos, registros, archivos y publicaciones relacionadas con el desarrollo de la tecnología de calcinación reductora en hornos de hogares múltiples, considerando los minerales específicos tratados en cada caso.

Resultados y discusión

Se diseñaron dos tipos de hornos: el “*Herreshoff*” por la “*Nichols Engineering & Research Corp.*”, y el “*Wedge*”, por “*Bethlehem Foundry & Machine Co.*” Ambos hornos están diseñados para calentar materias o minerales a altas temperaturas, permitiendo su fusión y posterior tratamiento final, ambos utilizan combustibles para generar calor y sistemas de control de temperatura. (3, 6, 16, 17)

Aplicación del horno Nichols-Herreshoff

Como elemento accesorio al horno fueron construidos entre el año 1928 – 1931, quemadores de llamas, ampliamente utilizados en EUA, diseñados por la “*Consolidated Mining and Smelting Co.*”, de Canadá ⁽¹⁸⁾, aunque posteriormente

por lo general se sustituyeron por los quemadores “*Hauck*”, desarrollado por la compañía “*Hauck Manufactoring Co.*”, de los EE.UU.

La experiencia hasta la fecha muestra que el horno “*Herreshoff*”, inicialmente se usó para matas sulfurosas y posteriormente para minerales de hierro, su uso principal estuvo basado en la eliminación de los contenidos de azufre al pasar las matas de un hogar a otro, debido fundamentalmente al aumento de la superficie de contacto entre el sólido y los gases durante la caída entre hogares.

Este es el principal motivo por el cual se construyeron diversos hornos tipo: “*Herreshoff*”, con disímiles números de hogares o pisos, encontrándose generalmente entre 8 a 16, con diferentes tiempos de retención para optimizar el tiempo de tratamiento térmico, según las zonas del horno y el tipo de material, lo otro, valorar si el tratamiento era reductor o una calcinación oxidante o ambas, según la materia a procesar.

Se considera que el horno perfeccionado por la “*Nichols Engineering & Research Corp.*”, recibió finalmente el apellido de sus autores de “*Nichols – Herreshoff*”, debido a los aportes en el desarrollo de las piezas, con la disminución del tamaño y simplicidad de los componentes del diseño original del horno “*Herreshoff*”.

Proceso de postcombustión directa

Posteriormente, se desarrolló y construyó un Horno de 12 hogares para la tostación del sulfuro de zinc. Este se caracterizó por una calcinación oxidante en los primeros hogares o superiores que se tomaron para el secado o descomposición del agua de constitución estructural con la introducción de aire. Es aquí donde comienza por primera vez el “Proceso de postcombustión directa”. Esta experiencia se tuvo en cuenta a la hora de construir otros hornos tipos: “*Nichols-Herreshoff*”, con un mayor número de hogares para el tratamiento de diversos minerales o materias primas o quemado de los residuos. Por ejemplo, en Cuba, se experimentó en febrero de 1956, pero no se aceptó esta operación al verse afectada las extracciones del contenido de níquel de las menas lateríticas reducidas; no es así, que a partir de 1958, al entrar en procesamiento en la “*Nickel Processing Corporation*” el yacimiento de minerales de Sol Líbano, con minerales meramente serpentiniticos (figura 1), los cuales este procedimiento no afectaba la metalurgia extractiva del níquel y

el cobalto, al utilizarse menas de silicatos de magnesio, solo a menas de alto contenido de hierro. (18, 19, 20, 21, 22, 23)

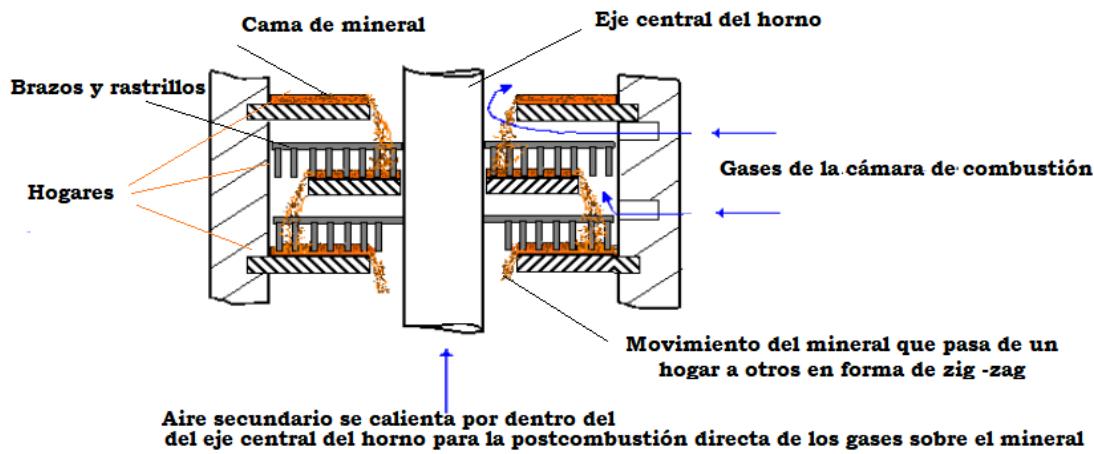


Fig. 1- Representación gráfica del interior del horno según (24).

Se conoce que la aplicación de la poscombustión directa se aplicó finalmente para todo una planta en la “Nickel Processing Corporation” en 1958 (21, 22), a pesar que desde el 29 de diciembre de 1943 se comenzó a producir el óxido de níquel, es decir, con la Nicaro Nickel Company. La valoración mostraba que se obtenían mayores recuperaciones del Ni y Co en la industria sin este procedimiento tecnológico (21, 23, 25, 40, 41), pero su introducción muchos años después de la rehabilitación de la planta, se obtuvo un sustancial ahorro de portadores energético (figura 2), pero con menas valoradas como serpentinitas hasta el año 1976, que se alimenta los minerales de alto contenido químico de hierro y se aprecia la influencia notable de la postcombustión directa al mineral, en los recobrados de los elementos valiosos.

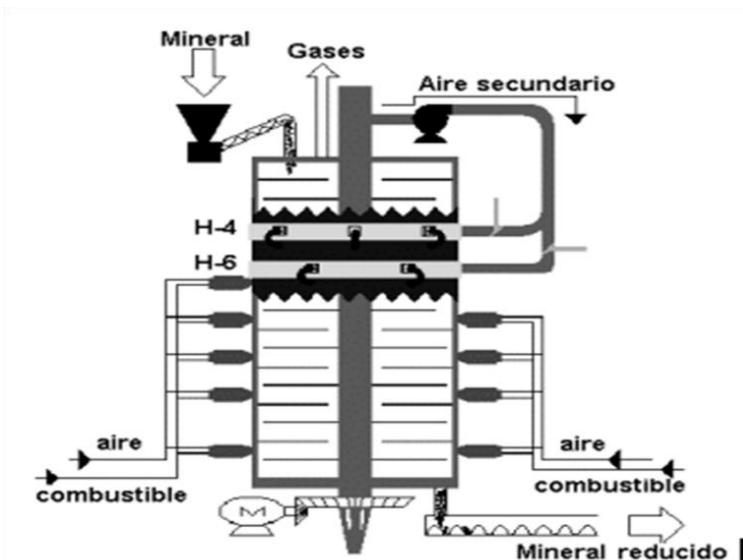


Fig. 2- Horno de hogares múltiples tipo: “Nichols-Herreshoff”, con adición de la postcombustión directa sobre el mineral laterítico a escala industrial. ^(39, 41)

Es conocido hoy en día y desde hace mucho tiempo que sin postcombustión en la reducción de minerales dentro de los hornos se obtienen mejores recobrados de níquel y cobalto. ⁴¹ Este procedimiento tecnológico de la postcombustión directa sobre el mineral, se introdujo en diferentes partes del mundo, desde 1958 en su totalidad en Nicaro, Cuba, y su generalización en otras plantas, entre ellos: Punta Gorda (Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (ECG) - Cuba), Yabulu (Queensland Nickel - Australia), Sered (Checoslovaquia), Marinduque (Filipina), Tocantín (Brasil), Sukinda (India), además, estuvo proyectada para la futura planta Las Camariocas - I (Cupey) en Cuba, entre otras. ^(23, 26, 27, 28, 29)

A continuación, se brindan algunas características del horno *Nichols-Herreshoff* bajo la explotación con el proceso de postcombustión directa al mineral en los hogares superiores del horno, desde hogar el H-4 al H-6 durante décadas en las plantas de Nicaro y Punta Gorda (tabla 1 y tabla 2).

Seguidamente se destacan las siguientes aplicaciones del horno de soleras múltiples, los cuales se han perfeccionado para lograr resultados con usos específicos, según la materia a utilizar (tabla 3). ^(4, 37, 38, 39)

Tabla 1- Hornos de reducción, planta de Nicaro, Cuba

Especificación	Unidad	Valor
Hornos	u	22
Hogares	u	17
Altura total	m	18,72
Diámetro exterior	m	6,76
Productividad	t/h	12,6 – 18,0
Aire de postcombustión Hogar H4	m ³ /h	1500
Temperatura de los gases Hogar H4	°C	700 - 800
Aire de postcombustión Hogar H6	m ³ /h	2400
Temperatura de los gases Hogar H6	°C	730 - 880
Total de cámaras	u	10
Tiempo de residencia	min	100 - 130
Presión de salida de los gases en H16	mm H ₂ O	1,5 – 4,0

Fuente: (30, 31, 32, 33, 34, 35, 36)

Nota: dado su deterioro, se llevaron en el 2007, sólo a 11 hornos en toda la planta metalúrgica, como estrategia de buscar de más eficiencia extractiva y organizativa, intentando lograr mayor productividad, con el aumento de la capacidad de diseño con la alimentación a más de 20 toneladas de mineral por hora hornos (Imposible de lograrlo).

Tabla 2- Hornos de reducción, Planta de Punta Gorda, Cuba

Especificación	Unidad	Valor
Hornos	u	24
Hogares	u	17
Volumen total	m ³	387
Diámetro interior	m	6,05
Diámetro exterior	m	6,78
Diámetro eje central	m	0,98
Altura eje central	m	18,89
Altura del horno	m	23,5
Productividad	t/h	13 - 20
Aire de postcombustión Hogar H4	m ³ /h	1200
Temperatura de los gases Hogar H4	°C	600 - 750
Aire de postcombustión Hogar H6	m ³ /h	2000
Temperatura de los gases Hogar H6	°C	700 - 820
Total de cámaras	u	10
Temperatura cámara de combustión	°C	1390 - 1400
Tiempo de residencia	min	95 -110

Fuente: (16, 24)

Aplicaciones del horno multihogar

En 1943, la “Freeport Sulphur Company” en Nicaro, Cuba, adoptó la tecnología de carbonato amoniacal, pero no utilizó los hornos rotatorios recomendados por los autores de la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal: Martinus H. Caron y Toshio Tatebe para tratar minerales saprolíticos inicialmente y posteriormente sus mezclas de limonita-serpentinitas, a pesar de las pruebas existentes en la práctica metalúrgica que confirman que los resultados son

superiores y donde nunca se aplicó el procedimiento de la postcombustión directa al mineral.

Seguidamente se destacan las siguientes aplicaciones del horno de soleras múltiples, los cuales se han perfeccionado para lograr resultados con usos específicos, según la materia a utilizar (tabla 3). ^(4, 37, 38, 39)

Tabla 3- Aplicaciones del horno multihogar

Materia prima	Producto
Carbón activado	Tierra Fuller
Revestimiento de recipientes de aluminio	Minerales auríferos
Cloruro de aluminio	Oxidos de hierro
Sulfato de aluminio	Cloruro de hierro
Minerales de antimonio	Caolín
Minerales arseniosos y speiss	Minerales de plomo
Asbesto	Cal
Barita	Piedra caliza
Sulfato de bario	Litarge
Bauxita	Magnesita
Carbón de hueso animal	Cloruro de magnesio
Carbón	Minerales de mercurio
Catalizadores	Pigmento de minerales
Carbón de madera	Concentrado de molibdeno
Arcilla	Oxido molíbdico
Mineral de cobalto	Minerales de óxido de níquel
Mineral de cobre	Catalizador de níquel
Oxido de cobre	Minerales de sulfito de níquel
Sulfato de cobre	Pirita
Capparosa	Pirita magnética
Creolita	Gránulos para techo
Diatomita	Borras de arcantarilla
Fosfato D- básico	Arena de moldeo
Dolomita	Carbonato de sodio
Borras electrolíticas de refinería	Minerales de tungsteno
Fluoropato	Minerales de zinc (arenas circón)
Alúmina reactiva	Alúmina
Sulfato de amoniaco	Sulfuro
Sulfuro de antimonio	Sulfuro
Extracción Arsenio	Fundición de estaño
Bauxita	Reactivación de Bauxita
Hidróxido Berno	Oxido de berilio
Carbono de lodo negro	Carbón
Calcinación de cemento	Cemento
Oxido férrico	Ferritas
Polvo férrico	Hierro esponja
Sulfato de plomo	Plomo
Calcinación de la cal	Cal
Concentrado de litio	Litio
Oxido de magnesio	Magnesia
Mena de la magnetita	Magnetita
Calcinación de níquel	Oxido de níquel

Fuente: (4, 37, 38, 39)

Conclusiones

Se analizaron los antecedentes históricos del desarrollo del horno de hogares múltiples “Nichols-Herreshoff”. Su aplicación data desde 1912 para calcinar en ocho hogares minerales de hierro y matas sulfurosas. A partir de la implementación de los mecanismos raspadores, quemadores de combustión, la circulación aire por el eje central del horno para el quemado de gases reductores en los hogares superiores, y el incremento del tiempo de retención a partir del diseño de 8 a 16 hogares, se logró hasta la actualidad el procesamiento de distintos materiales tales como: sulfuro de zinc, minerales lateritas, antimonio, arsénico, mena de magnetita, entre muchos otros. Además fue la tecnología representada por su amplio uso en la planta Nicaro Nickel Company en 1943, para no aceptar el horno rotatorio propuesto por los autores Caron y Tatebe.

Desde 1958, la técnica de postcombustión directa sobre el mineral se adoptó en industrias de níquel en Cuba (Nicaro), Australia, Filipinas y Brasil. Aunque durante los primeros años (1951-1958) las recuperaciones de níquel y cobalto eran mayores sin este proceso, la implementación de la postcombustión directa permitió lograr un ahorro energético sustancial, especialmente cuando los minerales alimentados tenían bajo contenido de hierro químico (como las serpentiniticas o saprolíticas), ya que este método no afecta dichas menas.

Recomendaciones

Se propone restaurar la capacidad de diseño de los hornos de reducción y los hogares H-4 a H-6 mediante la implementación de un sistema de postcombustión indirecta, manteniendo un promedio de alimentación de 12,6 toneladas por hora. Además, se recomienda evaluar y confirmar la viabilidad de incorporar esta tecnología para mejorar la eficiencia en la extracción del níquel y reducir el consumo energético. Es importante analizar cómo el proceso de postcombustión, especialmente si es directa, durante la calcinación del mineral, puede afectar las transformaciones mineralógicas en minerales con alto contenido de hierro, como limonita y lepidocrocita, que son: amorfas o semicristalinas. En este contexto, se sugiere realizar un tratamiento del mineral mediante irradiación externa durante la combustión de gases reductores a un

ducto interno por donde circula el mineral durante la alimentación al horno, con el fin de optimizar los resultados del proceso.

Agradecimiento

Al Dr. Waldo Damián Lavaut Copa, por sus contribuciones técnicas y sugerencias de corrección, para las mejoras de presentación del artículo.

Referencias bibliográficas

1. HABASHI, Fathi. *Textbook of Pyrometallurgy, Métallurgie Extractive*. Laval: Université Laval, 2002. National Libray of Canada, Ottawa, pp. 16–17. ISBN 2-922686-05-1.
2. MINGOT, Tomás de Galiana. *Pequeño Larousse de Ciencia y Técnica*. La Habana: Editorial Científico-Técnica, 1988. p. 802.
3. FURNAS, C.C. *Rogers Industrial Chemistry*. 7^a ed., en dos volúmenes. Nueva York: McGraw-Hill, 1943. pp. 75–98, 234–274.
4. MERRIAM-Webster. *McDougall furnace* [en línea]. Merriam-Webster.com Dictionary, [fecha de consulta: 14 abr. 2025]. Disponible en: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/McDougall%20furnace>
5. S/N. s.f. *Históricas sobre la Revolución Industrial y tecnología británica* [Bases de Datos Académicas (JSTOR)]. Disponible en: <https://www.jstor.org>
6. HAGLEY MUSEUM and Library; Tredyffrin Easttown Historical Society. *Tredyffrin Easttown History Quarterly*, **46**(1).
7. UNITED STATES PATENT OFFICE. *Official Gazette*, Tuesday, July 1, 1913, p. 1189. Patente US nº 1,086,955: *Rabble-arm for roasting-furnaces*.
8. WEDGE Utley. *Philadelphia*: Volumen 192—No. 1 Patent Company; filed el 8 mar. 1910; serial No. 548,024; pp. 75–143.
9. MÜLLER, H. *Historia de la tecnología de hornos en Alemania* [en línea]. Berlín: Editorial Técnica Alemana (Deutscher Technik Verlag), 1985. Disponible en: <https://www.deutscher-technik-verlag.de>
10. MERRIAM-Webster. *Fist Wedge* [en línea]. Merriam-Webster.com Dictionary, [fecha de consulta: 21 abr. 2025]. Disponible en: <https://www.merriam-webster.com/dictionary/fist%20wedge>

11. KALPAKJIAN, S.; SCHMID, S.R. *Manufacturing processes for engineering materials* [6th ed.] [en línea]. Pearson Education, 2014. Disponible en: <https://www.pearson.com/store/p/manufacturing-processes-for-engineering-materials/P100000123>
 12. GORDON, S. Chemical Constructions Co.: *History and Projects* [en línea]. Journal of Industrial Engineering, vol. 45, no. 3, 2000, pp. 123–135. Disponible en: <https://www.journals.elsevier.com/international-journal-of-industrial-engineering>
 13. CHEMICAL CONSTRUCTIONS CO. Annual Report. Chemical Constructions Co., 1985. Editorial: Industrial Publishing House.
 14. JOHNSON, R. T. *Treatment of Ferrous Sulfates in Industrial Processes* [en línea]. Industrial & Engineering Chemistry Research, **27**, 1988, pp. 1234–1245. Disponible en: <https://www.acs.org>
 15. DOE, J. *Innovations in Chemical Engineering: A Historical Perspective* [en línea]. Chemical Engineering Journal, **78**, 1995, pp. 89–102. Disponible en: https://bibcercador.uab.cat/permalink/34CSUC_UAB/1gacac9/alma991007200579706709
 16. UNIÓN DEL NÍQUEL. 1992. *Caron process study* [evaluación técnica]. Sherrit Gordon Limited, Canadá (en inglés).
 17. LINDSAY, R. 2005. *Industrial Furnaces: Principles and Practice*. CRC Press. Disponible en: <https://www.crcpress.com>
 18. CLARK, J. H. 1932. *Industrial and Engineering Chemistry*, **24**, p. 717. American Chemical Society (ACS) Publications. Disponible en: <https://pubs.acs.org/>
 19. TOBELMANN, A. H.; MORGAN, H. J. 1945. *Review of the Nicaro Nickel Project*, Report No. 97271, Plancor 690. Technical Report No. 1195, U.S. Department of Commerce, Washington, D.C., 21 páginas. Disponible en: <https://classic.ntis.gov/> y en el Departamento de Investigación de Nickel Processing Corporation (Nicaro, actual CEDINIQ).
 20. DAUBENSPECK, J. 1956. *Introduction of additional air to Hearth No 6*, Nicaro, Oriente, 6 páginas. Disponible en: <https://bnc.cu> y en el Departamento de Investigación de Nickel Processing Corporation (Nicaro).
-

21. DAUBENSPECK, J.; NIEDERMEYER O.D.; ALBERTSON R.F.; POLL J.A.; PRESILLA D.L., autores del documento a quien se dirige la información: *Introduction of secondary air in the H-6 [informative letter]*, Nickel Processing Corp., Nicaro, Oriente, 1956 (2 páginas). Disponible en: Departamento de Investigación de Nickel Processing Corporation (Nicaro).
22. ALONSO, A.; DAUBENSPECK, J. 1958. *Modifications in Nicaro Metallurgy* [Memorandum]. Por Armando Alonso, Ingeniero Jefe de Procesos y John Daubenspeck, Ingeniero Jefe de Metalurgia, Nickel Processing Corporation, Nicaro, Oriente, Cuba. 5 páginas.
23. VÉLIZ, J.A.; MERENCIO, P.; MIRANDA, L.I., 2017. *Estudios de las tecnologías Caron y de lixiviación ácida a presión durante el procesamiento de las lateritas de baja ley de níquel y de los escombros lateríticos clasificados como menas industriales o minerales no industriales* [en línea]. En: IX Conferencia Internacional de Aprovechamiento de Recursos Minerales "CINAREM'2017", ISMM Moa; Dr. Antonio Núñez Jiménez; ISBN 978-959-16-3441-2; 14 noviembre 2017; pp. 70. Disponible en: <http://cinarem.ismm.edu.cu/resumenes/METALMATER17/Jorge%20Miranda%20Lopez-Estudios%20teorico-precticos....pdf>
24. S/N. 1985. *Manual de operaciones, taller de hornos de reducción* [en biblioteca de la empresa]. ECG, Moa.
25. GONZÁLEZ, R. 1979. *Introducción de aire secundario en los hornos de pisos de Nicaro*. Reporte de Investigación No 575, Departamento de Información Técnica, CIPIMM, La Habana, 21 páginas. Disponible en: <http://cipimm.cu>
26. REID, G.J.; FITTOCK, J.E. 2004. *Yabulu 25 Years On*. En: IMRIE, W.P.; LANE, D.M., editores. *International Nickel Symposium*. The Minerals, Metals & Materials Society (TMS), pp. 599-618.
27. MISUT, V. 1972. *Problemas de la realización práctica de la lixiviación amoniacial de los minerales lateríticos* [Informe técnico]. Planta Niquelífera de Sered (RSCME), Traducción CIPIMM, La Habana, 23 páginas.

28. CASTELLANO, S. J. 1974. *Metalurgia Extractiva de los minerales oxidados del Níquel*. CIPIMM, La Habana, 64 páginas. Disponible en: <http://cipimm.cu>
29. MIRANDA, J. L. 2007. *Leaching carbonate ammonical technology (Process Caron). Historical antecedents*. En: 9th International Symposium Cultural Heritage Symposium in Geosciences, Archaeology, Mining and Metallurgy, Quebec, Canadá, 3-7 septiembre, pp. 57.
30. ALEPUZ LLANZANA, H.; Col., 1998. *Identificación del horno industrial* [Informe técnico]. CIL, Moa.
31. S/N. 1954. *Nichols Engineering and Research Corporation* [Informe técnico]. Traducción del Centro de Información Tecnológica, Universidad de Oriente.
32. LÓPEZ CARDET, P. 1963. *Níquel extractable en hornos (Causas)* [Informe técnico]. Nicaro.
33. BARRIOS GÓMEZ, J. 1966. *Algunas consideraciones sobre la recuperación del níquel en los hornos de reducción* [Informe técnico]. Nicaro.
34. DAUBENSPECK, J., 1956. *Diverse correspondence on the reduction of the nickel in the furnace* [Technical report]. Nickel Processing Corporation, Nicaro (en inglés).
35. LISSABET I., GILBERTO 1986. *Influencia del tonelaje en los índices de operación de los hornos de reducción* [Informe técnico]. Nicaro.
36. ROVIRA, J. César. 1979. *Informe Técnico de investigación sobre el aumento de la productividad en los hornos de reducción* [Informe técnico]. Nicaro.
37. BROCK, W.H., 1992. *A History of Chemistry*. Nueva York: Wiley; American Chemical Society; Journal of Chemical Education o Chemical Reviews; disponible en: <https://www.acs.org/funding/awards.html>

38. HAND, W.H., 1962. *The Herreshoff Manufacturing Company: A History of Innovation* [historical document]. Smithsonian Institution Archives. Disponible en: <https://siarchives.si.edu/>
39. s.f. *Multiple Hearth Furnace* [sitio web]. Disponible en: <http://industrialfurnace.com/multiplehearthfurnace/>
40. Ramírez-Pérez, I. M., Ramírez-Serrano, B. Efecto de la postcombustión sobre los principales índices técnico-económicos en un horno Herreshoff para la producción de níquel. *Minería y Geología*. [en línea]. 2021, **37**(4). 426-444. https://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamg/article/view/art4_No4_2021
41. Palma, H.J.A., Legrá, A.L., Urgellés, A.L., Gálvez, E., Castillo, J. Post-combustion Effect on Nickel and Cobalt Extractions from the Caron Process. In: Bindhu, V., R. S. Tavares, J.M., Tălu, Ş. (eds) *Proceedings of Fourth International Conference on Inventive Material Science Applications. Advances in Sustainability Science and Technology*. Springer, Singapore, 2022. https://doi.org/10.1007/978-981-16-4321-7_43

Conflictos de Interés

No existen conflictos de interés.

Contribución de los autores

Jorge Miranda López: conceptualización, metodología, investigación, escritura y corrección.