



Tecnología Química

ISSN: 0041-8420

revista.tec.quimica@fiq.uo.edu.cu

Universidad de Oriente

Cuba

Chang Cardona, Antonio Ramón; Rojas Vargas, Armando  
LA LIXIVIACIÓN DEL PROCESO CARON: SÍNTESIS DEL CONOCIMIENTO PARA SU  
PERFECCIONAMIENTO INDUSTRIAL. PARTE II  
Tecnología Química, vol. XXIX, núm. 2, mayo-agosto, 2009, pp. 96-105  
Universidad de Oriente  
Santiago de Cuba, Cuba

Disponible en: <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=445543759012>

- Cómo citar el artículo
- Número completo
- Más información del artículo
- Página de la revista en redalyc.org

redalyc.org

Sistema de Información Científica

Red de Revistas Científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal

Proyecto académico sin fines de lucro, desarrollado bajo la iniciativa de acceso abierto

## LA LIXIVIACIÓN DEL PROCESO CARON: SÍNTESIS DEL CONOCIMIENTO PARA SU PERFECCIONAMIENTO INDUSTRIAL. PARTE II

Antonio Ramón Chang Cardona\*, Armando Rojas Vargas\*\*  
Instituto Superior Minero-Metalúrgico de Moa\*, Centro de Investigaciones del  
Níquel (CEINNIQ), Nicaro, Holguín

*El principal objetivo del presente trabajo es fundamentar las vías para incrementar la extracción de cobalto sin sacrificar la de níquel en la lixiviación del Proceso Caron. Para alcanzarlo, se analizaron las causas de pérdidas de Ni y Co por la pasivación de las ferro-aleaciones con Ni y Co en la mena reducida, basado en los resultados científicos y tecnológicos de investigadores cubanos y extranjeros, que se han validado por la práctica industrial. En el trabajo, se interrelacionan los factores de todos los tipos de pérdidas de Co y Ni para fundamentar las principales líneas de perfeccionamiento de la operación de lixiviación en las dos plantas cubanas de forma integral, analizándolas como un sistema formado, además por las operaciones de: reducción, absorción del  $\text{CO}_2$  y  $\text{NH}_3$  para producir licor fresco, y por la precipitación del sulfuro de Co. Se evaluaron los riesgos de la transferencia tecnológica de los turbo-aireadores de Tocantins para la empresa Punta Gorda. Se citaron 17 referencias bibliográficas.*

**Palabras claves:** proceso Caron, lixiviación, cobalto, níquel, Mmena laterítica.

*The main objective of the present work is to base the routes to increase the cobalt extraction without exposing the nickel one in Caron leaching Process. In order to reach it, the causes of losses of Ni and Co by the passivity of the ferro-alloys with Ni and Co in the reduced ore were analyzed, based on the scientific and technological results of Cuban and foreign researchers, validated by the industrial practice. In the work, the factors of all types of Co and Ni losses interrelate to base the main lines of improvement of the leaching operation on the two Cuban plants of integral form, analyzing them as a formed system, also for the operations of: reduction, absorption of the  $\text{CO}_2$  and  $\text{NH}_3$  to produce fresh liquor, and by the precipitation of Co-sulphide. The risks of the technological transference of Tocantins turbo-mixer were evaluated for Punta Gorda Plant. In this work 17 bibliographical references were mentioned.*

**Key words:** CARON process, leaching, cobalt, nickel, lateritic ore.

### Introducción

En la primera parte de este trabajo se analizaron las pérdidas de Co y Ni por hidrólisis y coprecipitación de estos con los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH), así como las medidas para minimizarlas. No obstante, en todas las plantas industriales con tecnología carbonato-amoniaco (TCA), las extracciones de Ni y Co están afectadas por la pasivación de sus ferroaleaciones, contenidas en la mena laterítica reducida (MR). Los factores que influyen sobre estas son menos conocidos, lo cual no permite tomar las medidas que puedan atenuar las pérdidas de dichos metales. Por tanto, en esta segunda parte, se analizarán dichos factores para completar el cumpli-

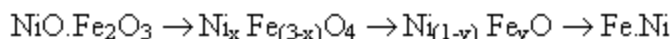
miento del objetivo principal de la parte I. También, se plantea como objetivo específico debatir las líneas para el perfeccionamiento integral de dicha lixiviación, sus prioridades y estrategias para el desarrollo de las plantas cubanas.

### Metodología

La metodología que se empleará para cumplir con dichos objetivos será el análisis bibliográfico sintetizado y la integración de los conocimientos científicos y tecnológicos universales que se han validado, por la práctica industrial durante los años de existencia del Proceso Caron para sistematizarlos. Los métodos deductivo y empírico, se complementarán con los fundamentos teóricos de los trabajos que se citen.

## Resultados y discusión

Durante la reducción de las menas lateríticas se producen ferroaleaciones de Ni-Co, causadas por la elevada resistencia a la reducción que le ofrece la matriz de los óxidos de Fe a los gases reductores, al quedar atrapados los óxidos de Ni y Co dentro de la misma. La causa de origen es la rápida disociación a la que están sometidos los óxidos de hierro en los primeros hogares del horno



Análogamente, le sucede al cobalto. Se considera que estas aleaciones forman parte del contenido total de hierro metálico en la MR (alrededor de un 4 %).

Durante la lixiviación, los agentes oxidantes (oxígeno disuelto, iones tiosulfatos y de Co trivalente) presentes en el licor lixivante son los responsables de la pasivación de las partículas de ferroaleaciones, debido a la formación sobre su superficie de una capa de óxidos y sulfuros de metales que no permiten la extracción de Co y Ni en el sistema de lixiviación y lavado.

### Pérdidas de Ni y Co por pasivación de las aleaciones combinadas de Fe-Ni-Co

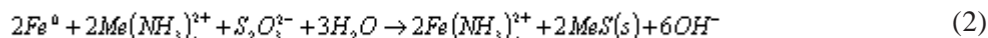
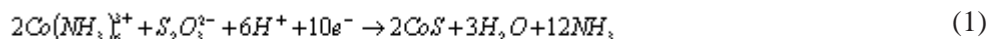
Este tipo de pérdida ocurre paralelamente a las tres anteriores en todo el sistema de lixiviación desde los tanques de contactos. Su magnitud dependerá en buena medida de la masa de ferroaleaciones de Ni y Co, formadas en los hornos de reducción, así como de la concentración de iones tiosulfatos ( $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$ ) en el licor lixivante /9, 10, 12/, cuya fuente principal es el azufre del fuel oil en exceso, contenido en la mena reducida. Por otra parte, antes se había demostrado la pasivación del Co y el Fe metálicos durante la

Herreshoff, sobre todo la goethita, cuyo mineral es mayoritario en la mena y porta dentro de sí parte del Ni y del Co en forma de óxidos. La cristalización brusca de la goethita a hematina, no le permite a toda la masa de óxidos de Ni y Co desprenderse de su mineral portador /5/. Entonces, la reducción del Fe, Ni y Co durante el tiempo de retención de la mena en el horno evoluciona dentro de la matriz de óxidos de hierro por el siguiente esquema:

aireación en licores amoniacales puros /7, 8, 11/, lo que confirmó la formación de óxidos de hierro en su superficie. En la práctica industrial, los licores productos poseen entre 2,5 y 4 g/L de iones tiosulfatos y entre 6 y 9,5 g/L de iones sulfatos. Estas elevadas concentraciones de los iones del azufre, presuponen un riesgo de pérdidas de Ni y Co durante la lixiviación por la gran masa de dichos iones en evolución hacia sulfato.

La evidencia científica más contundente de la existencia de este tipo de pérdida fue presentada por un equipo de investigadores australianos /10/ al determinar por microscopía electrónica de barrido (SEM) y análisis espectrométrico por energía de dispersión de rayos x (EDS) la composición atómica de la superficie de un electrodo rotatorio de Fe en forma de disco; el cual estaba cubierto mayoritariamente por películas de sulfuros de Co y Ni (en proporción de 2:1), además de óxidos de Fe (sistema magnetita-maghemita y goethita), que no permiten lixiviar al Ni y al Co contenidos en la ferroaleación.

Las mediciones electroquímicas realizadas en un Potenciostato y en la planta de Yabulu por los australianos explican la formación de los sulfuros /9, 10/ y su preferencia hacia el cobalto por las reacciones redox:



Dichas reacciones reflejan un complejo rol de los iones  $\text{S}_2\text{O}_3^{2-}$  durante la lixiviación como oxidantes y reductores al mismo tiempo, indican-

do la necesidad de profundizar en el estudio de sus efectos positivos o negativos en función de su cantidad durante la lixiviación. En pruebas reali-

zadas con MR de Nicaro /16/ se demostró (figuras 1 y 2) que cualquier concentración de iones tiosulfato en el orden de las décimas o superior a estas ejercen una función reductora sobre los iones de Co en primer lugar y sobre el Ni en menor medida, precipitándolos en forma de sulfuros, ya que ninguna de sus eficiencias de lixiviación (EFNi y EFCo) superan a las de su propio turbo para el licor lixivante sin adición de este.

En las figuras 1 y 2 se observa, que a concentraciones de iones tiosulfato menores que 3 g/L, en el turbo 1 predomina su efecto reductor sobre el oxidante (por la pendiente negativa de la línea recta), que en el caso del Co figura 2, se extiende hasta la  $CS_2O_3^{2-}$  de 3,5 g/L. En el turbo 2, se manifiesta un predominio de la velocidad de oxidación de ambos metales sobre la velocidad de su precipitación en forma de sulfuros, respecto a la eficiencia de lixiviación del turbo1, debido a la incorporación de los complejos amoniacales de Co (III) como oxidante, pero en los turbos 3 y 4 casi no hay extracción de Co, lo que afianza el criterio del agotamiento del Co lixiviable por su precipitación en forma de sulfuros en el primer turbo. En el caso del

Ni existe un sostenido incremento de la EFNi del turbo 1 al 4, pero con una ligera pendiente negativa en el rango de concentración analizado, lo que confirma su precipitación minoritaria como sulfuro, al mismo tiempo que sucede la disolución de su sulfuro y la oxidación del Ni metálico.

Para concentraciones de iones tiosulfatos mayores que 3,5 g/L el comportamiento de ambos metales cambia hacia un crecimiento de las EFNi y EFCo, pero con la particularidad siguiente: mientras mayor es la  $CS_2O_3^{2-}$ , el incremento de sus eficiencias entre turboaireadores va disminuyendo, que puede atribuirse a la suma de las reacciones de lixiviación del Ni y el Co metálicos por los tres oxidantes y a la de disolución de parte de sus sulfuros precipitados. El exceso de masa de  $S_2O_3^{2-}$  cataliza la lixiviación, independientemente de la velocidad de aireación empleada, pero enmascarando sus pérdidas. Pero el problema es más complejo cuando se lixivia MR industrial, ya que es necesario considerar, que al incrementarse la  $CS_2O_3^{2-}$  disminuyen las velocidades de oxidación del Fe (II) y de formación de los OHH, que favorecen las de lixiviación de los metales /2, 4/ y aumentan las extracciones del Ni y el Co.

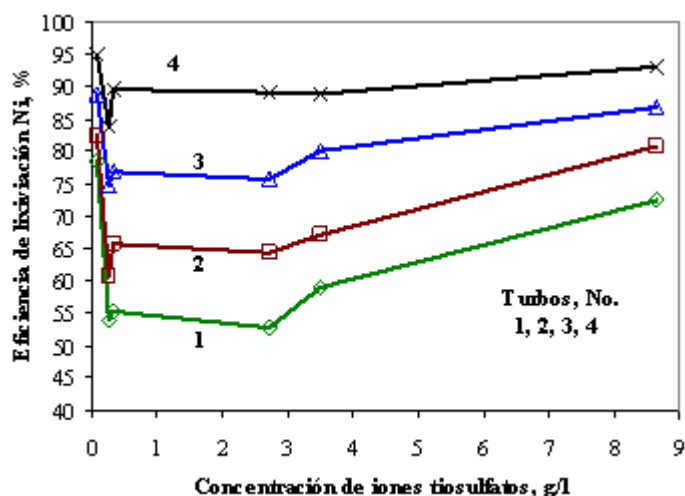


Fig. 1 Influencia de la concentración de iones tiosulfatos sobre la eficiencia de lixiviación del Ni/6/.

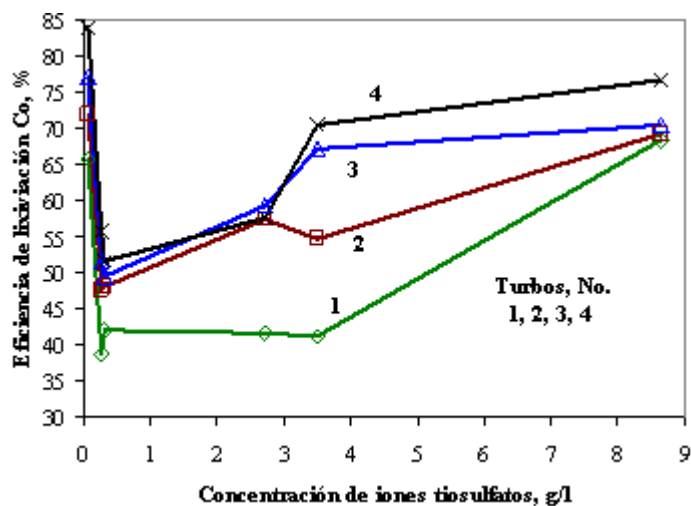


Fig. 2 Influencia de la concentración de iones tiosulfatos sobre la eficiencia de lixiviación del Co/16/.

Como resultado, la superficie y grosor de la película de óxidos disminuyen, retardando la pasivación de la ferroaleación durante la lixiviación y atenuando la magnitud de las pérdidas de Co y Ni por coprecipitación segregante con los OHH.

Por otra parte, las mediciones de los potenciales redox ( $E_x$ ) del sistema con y sin iones tiosulfatos indican que durante la aireación, los iones tiosulfatos ejercen un efecto oxidante sobre el hierro, disolviéndolo al inicio con el máximo valor negativo de  $E_x$ , el cual será reforzado /9/ a medida que se incremente la  $CS_2O_3^{2-}$ , cuyos iones reducen a los hidroxocomplejos de Fe (III), reflejándose en un  $E_x$  más negativo /4/. Pero a medida que pasa el tiempo, parte del Ni y Co, y casi todo el Fe disuelto se van precipitando gradualmente (en las formas antes mencionadas) sobre la ferroaleación hasta cubrirla totalmente, con el consecuente aumento de los valores de  $E_x$ .

Es necesario destacar que el diagnóstico de este tipo de fenómeno es complejo y puede ser estudiado mediante la medición de los  $E_x$ , integrando estos resultados a la metodología para operar el flujo de aire que se analizó en la parte I sobre las pérdidas de Co por coprecipitación segregante con los OHH, lo que afianza el criterio de optimizar el régimen de aireación, empleando como herramienta- la medición del potencial redox de la pulpa en el sistema de lixiviación con un nuevo sentido práctico.

### Líneas para el perfeccionamiento de las plantas de lixiviación en Cuba

Como se pudo observar en las tablas 1 y 5 de la parte I del presente trabajo, las plantas cubanas son las más atrasadas tecnológicamente, lo que presupone una inversión considerable para modernizarlas, y de un financiamiento para la investigación en Cuba de los aspectos que se han fundamentado en cada tipo de pérdida.

Todo el análisis realizado en las partes I y II indica, que solo es posible el incremento productivo duradero en Co y Ni con el menor costo de producción, si se resuelve integralmente los temas claves del circuito reducción-lixiviación-recuperación y absorción de  $NH_3$  y  $CO_2$  – precipitación de cobalto. A continuación, se analizarán las principales prioridades.

### Optimizar el régimen de aireación de acuerdo a las particularidades de cada planta, en cuanto a calidad de la mena reducida y composición del licor lixivante

La comprensión de la existencia de tres agentes oxidantes ( $O_{2(dis)}$ ,  $Co^{3+}$ ,  $S_2O_3^{2-}$ ) en la planta de lixiviación, y del comienzo de la acción de los dos últimos en el sistema: tanques de contacto-distribución

buidor-tuberías para la transportación de la pulpa hasta cada serie de turbos, con una contribución a las extracciones de Ni y Co, que pueden alcanzar 40-45 % de Ni y 12-20 % de Co respecto a la mena alimentada a la planta de hornos de reducción, permiten reformular la necesidad real de aire a introducir por cada tonelada métrica de mena laterítica reducida ( $V_a$ ). Si además, se considera la complejidad de su cálculo, al reconocer el mecanismo autocatalítico del sistema de iones amoniacales complejos Co(III)/Co(II) durante la oxidación de los metales y sus ferroaleaciones, y el incremento de la eficiencia de absorción del oxígeno por el perfeccionamiento constructivo de los turbos, entonces es obvio el uso de menos cantidad de aire  $V_a$  para lixiviar cada tonelada de MR.

Más complejo aún se torna el uso del aire, al entender las complejidades de las interacciones físico-químicas entre los iones de metales y no metales (iones del azufre,  $NH_4^+$ ,  $OH^-$ ,  $CO_3^{2-}$ ) del licor lixiviante y la MR con diferentes calidades, los cuales modifican la correlación cantidad-calidad de los compuestos sólidos, resultantes de los diversos tipos de pérdidas de Ni y Co que hacen variar sus extracciones. Todo lo cual justifica la necesidad de perfeccionarlo empíricamente para operar por los modelos multivariantes que resulten más apropiados en la práctica industrial.

De todas las líneas de perfeccionamiento es la más sencilla, ya que no requiere de grandes inversiones, pero sí, de nuevas investigaciones a escala industrial por la metodología propuesta en la parte I, además de capacitar a los operadores y grupos de técnicos de la planta. Este tipo de investigación se puede comenzar de inmediato en cualquier planta. La misma deberá estructurarse en dos partes, la primera tiene el objetivo de decidir con qué flujo de aire comenzar la aireación, mientras que la segunda, definirá si es necesario diferenciar dicho flujo en cada turbo y en qué medida habrá que hacerlo. Cuando se cambie la composición del licor lixiviante y se invierta en turbos más modernos habrá que ajustar el régimen de aireación por esta metodología porque cambiará la cinética del proceso. Mientras se materialicen las inversiones de Punta Gorda en un

período de 2-4 años, se podrá ir incrementando la producción y después tratar de acercarse más las extracciones de Ni y Co a sus extractables.

Por otro lado, como se fundamentó en la parte I es importante para la economía del país perfeccionar la metodología actual para determinar los extractables de Ni y Co en las dos plantas cubanas /17/ con la finalidad de aprovechar sus reservas productivas, que lixiviación hoy desconoce, sin necesidad de nuevas inversiones. Su implementación servirá de motor impulsor para perfeccionar la planta y exigir mayor disciplina tecnológica en las operaciones.

### **Optimizar la composición del licor lixiviante por $NH_3$ y $CO_2$ en función de la temperatura de la pulpa en lixiviación**

Dicha optimización hay que realizarla sobre la base de las investigaciones planteadas en parte I y por los estudios de ingeniería para mejorar el sistema de absorción del  $CO_2$  y  $NH_3$  con el objetivo de obtener un licor fresco (LF) con la composición óptima en la planta de recuperación de amoníaco. Esto constituye la base para el incremento de la producción de Ni y Co, y la disminución del número de turbos, ya que el aumento de la potencia específica ( $P_{esp}$ ) de los reactores y de su capacidad no es condición suficiente para alcanzar los resultados de Yabulu-QNI, debido a que la cinética de la lixiviación del Ni ocurre en un régimen mixto o de transición /6/ en el intervalo de temperatura 308-323 K (35-50 °C), con un predominio, al principio de la lixiviación, de la composición del licor lixiviante y de la temperatura (componente cinético), mientras que a partir del segundo o tercer turboaireador, predomina el componente difusivo, aunque este transcurre con alta resistencia, lo cual ha sido confirmado al procesar los datos cinéticos de la lixiviación de MR de Nicaro a escala de banco (26 dm<sup>3</sup> de pulpa) por la ecuación de Jander /2, 3, 15/, que modela la difusión tridimensional (esférica) de las partículas de Ni.

$$1 - [1 - \alpha(t)]^{1/3} = K^* t^2 \quad (3)$$

donde K es la constante de velocidad de disolución del Ni, Co, en L/h; y  $\alpha$  ( $\tau$ ) es el grado de lixiviación del Ni durante el tiempo de aireación, en fracciones de unidades.

Al graficar la ecuación (3) en los ejes de coordenadas  $\{1 - [1 - \alpha(t)]^{1/3}\}^2 = f(t)$ , entonces se puede determinar K, a partir de las regularidades de la primera etapa de lixiviación del Ni que se muestran en la figura 3, la cual fue obtenida para un mismo tipo de MR y un licor lixiviante, que contiene  $\text{NH}_3$ ,  $\text{CO}_2$  en el rango de su composición óptima, y solo se varió la concentración de Co (II) para analizar su influencia sobre la cinética de lixiviación y las pérdidas de Co. Por tal razón, no se expondrá la figura para el Co, pues como se mostró en la parte I, sus máximos de extracciones y constantes de velocidad (sobre todo, en la zona I) disminuyen, tanto con el incremento de la concentración de Co ( $C_{Co}$ ), como con el aumento de la velocidad específica de aireación ( $Q_a$ ). Sin embargo, en la zona I, la cinética de la lixiviación

del Ni no depende de la  $C_{Co}/2, 3/$ , mientras que al aumentar  $Q_a$ , en  $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$  desde 1,1 hasta 1,8; en la primera zona de aireación se observa un comportamiento acorde con la ecuación de Jander, obteniéndose una clara línea recta, como promedio, que no depende de  $Q_a$  con un valor de  $K=0,17$  L/h, confirmando la presencia del régimen mixto con predominio de la composición del licor y la temperatura. Después del primer máximo, se vuelve a manifestar otra línea recta, seguido de un segundo máximo que se ordena de mayor a menor  $Q_a$ , caracterizando al régimen difusivo, al ser sus constantes de velocidad  $K_i$  diferentes entre si, las cuales crecen linealmente con el aumento de  $Q_a/2, 15/$ . Posteriormente, se vuelve a interrumpir la regularidad con un decrecimiento de sus máximos relacionado con la coprecipitación de Ni con los OHH por segregación, que para el caso de sus iones divalentes, se expulsan en la tercera zona con acentuada expresividad, lo que no sucede con el Co por las causas ya analizadas en la parte I.

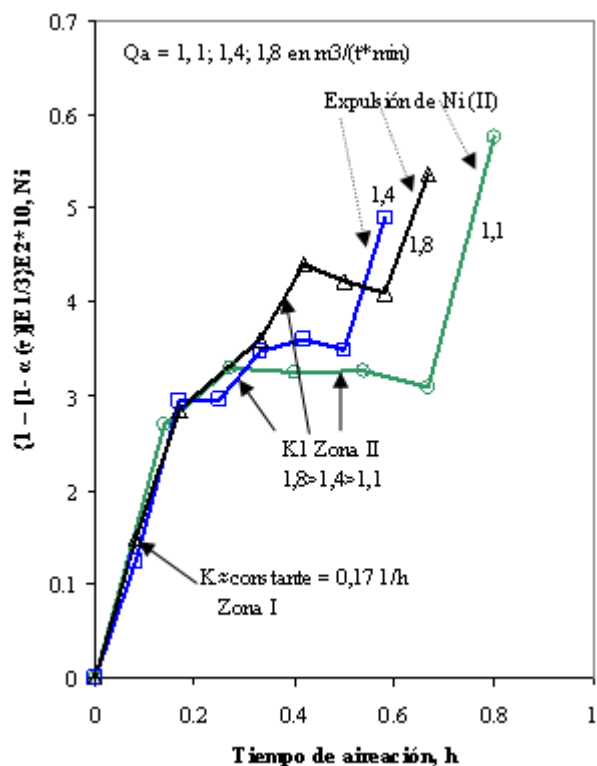


Fig. 3 Cinética de la 1ra etapa de lixiviación del Ni por la ecuación de Jander para una MR de Nicaro/2/.

---

Este comportamiento cualitativo, fue reproducido en numerosos experimentos a diferentes regimenes de aireación, tipos de MR, composición iónica del licor lixiviante y en el rango de temperatura de 40 a 52 °C.

La implementación práctica de este conocimiento permite tomar decisiones óptimas para perfeccionar y modernizar la planta de lixiviación, por ejemplo, mediante una inversión que incluye la transferencia de tecnología de Tocantins hacia Punta Gorda. Si esta arrancara sin contar con la composición óptima del LF, se correría el riesgo de no alcanzar los resultados esperados en el estudio de factibilidad por no contar con la fortaleza química exigida por el régimen mixto. Además, hay que considerar la diferencia sustancial de la mena reducida de ambas plantas (ver parte I-tabla 3), que determina la calidad de ambas MR, por sus diferentes propiedades físicas, químicas, mineralógicas, morfológicas y distribución granulométrica, lo que implicaría un cierto riesgo económico de dicha inversión. Para atenuarlo, se recomienda realizar pruebas de adaptación tecnológica, antes de contratar la planta completa. Por tales razones es más seguro garantizar primeramente la inversión para optimizar la mencionada composición del licor lixiviante, minimizando la cantidad de experimentos para comprobar el comportamiento de la mena reducida cubana.

### **Incrementar la capacidad de precipitación del Co en forma de sulfuro mixto con el Ni**

Para evitar la contaminación de los productos finales es obligatorio precipitar el exceso de Co que se extraerá en lixiviación como resultado de la implementación de las dos líneas anteriores,

lo que implicaría una inversión complementaria en reactivo precipitante (compra o producción), y en equipos, que se debe tener lista antes de introducir el licor lixiviante optimizado en el sistema de lixiviación y lavado. Para el caso de Nicaro, se debe incluir la precipitación del Co del licor de 2<sup>da</sup> etapa para bajar su contenido en el licor que se recircula a tanques de contacto e incrementar la producción de dicho sulfuro. Actualmente la planta de Punta Gorda prepara dichas condiciones.

### **Invertir en una planta de lixiviación más productiva y compacta**

Después de garantizar las dos inversiones anteriores-acápites 2 y 3, entonces es recomendable la arrancada de la nueva planta, ya que solo en estas condiciones es posible intensificar el componente difusivo como parte de la velocidad del proceso de lixiviación del Ni y el Co por el régimen de transición, lo que permitirá completar la disminución del número de etapas de lixiviación, de reactores y espesadores debido al incremento de la Pesp de agitación (tabla 1) y de la capacidad de cada turbo (volumen útil), además de minimizar las pérdidas de NH<sub>3</sub> al eliminar el gigantismo actual de dichas plantas. Esto constituye el mayor peso de la modernización total que garantizará el incremento de las extracciones de Co y Ni, y de sus producciones con el menor costo de explotación.

De la tabla 1, se debe comprender que las mayores Pesp por turbo la poseen las dos plantas extranjeras, aunque algo mayor en los tres últimos turbos de Yabulu. Las plantas cubanas quedan muy por debajo, lo que ha traído como consecuencia un mayor arenamiento y más turbos por planta.



Tabla 1  
Potencias específicas de los turboaeradores de primera etapa en las plantas de lixiviación carbonato-amoniaco en funcionamiento

Turbo No.	YABULU		NIQUELANDIA		Punta GORDA		NICARO	
	1982 /14/		1999 /13/		1992			
	kW	KW*h/m <sup>3</sup>	kW	kW*h/m <sup>3</sup>	kW	kW*h/m <sup>3</sup>	kW	kW*h/m <sup>3</sup>
1	150	0,25-0,29	150	0,25-0,30	75	0,13-0,14	40	0,11
2	110	0,18-0,22	90	0,15-0,18	75	0,13-0,14	40	0,11
3	110	0,18-0,22	90	0,15-0,18	75	0,13-0,14	40	0,11
4	110	0,18-0,22	90	0,15-0,18	75	0,12-0,14	40	0,11
5					75	0,12-0,14	40	0,11
6					75	0,12-0,14		
<b>TOTAL</b>	480	0,8-0,95	420	0,75-0,84	450	0,75-0,84	200	0,55
<b>Q<sub>P</sub>, m<sup>3</sup>/h</b>		510-600		500-590		540-600		372
<b>τ<sub>R</sub></b>		1 h		1 h		0,58 h		0,7 h
<b>V<sub>util</sub>, m<sup>3</sup></b>	148		148		52		52	

A pesar de los resultados antes expuestos, todavía queda la duda, si es más conveniente instalar mayor  $P_{esp}$  en los turbos 2 y 3 e incrementar la velocidad de aireación para intensificar el régimen difusivo. Todo lo cual necesita de investigación y su correspondiente estudio de ingeniería.

Como en Nicaro no habrá tal inversión, se debe ir perfeccionando el equipamiento mediante la introducción de los resultados de las investigaciones que se realicen a escala de planta piloto y unidad demostrativa industrial o de producción (UDP).

### Perfeccionar la reducción de la mena cruda

La calidad de la mena reducida depende en buena medida del tipo de mena laterítica cruda y de su grado de homogenización en los silos, de donde se alimenta a la planta de hornos de reducción. Pero también, sobre dicha calidad influyen otros muchos factores técnicos y operacionales objetivos y subjetivos que hacen fluctuar los extractables de Ni y Co durante los turnos de trabajo. Por otra parte, la operación de enfriamiento de la MR garantiza una buena parte de la temperatura de la pulpa en tanques de contacto, y por ende, la de lixiviación. Estos aspectos provocan la variabilidad de las extracciones de Ni y Co en lixiviación para dichos turnos, constituyendo

una de las grandes reservas de producción de ambos metales en la actualidad.

Hasta ahora, la lixiviación no ha tenido respuesta operacional a la variación de la calidad de la MR por no poseer una herramienta adecuada capaz de detectarla a tiempo, como la que se propuso en la parte I. También, queda mucho por perfeccionar en cuanto a: validar en la planta los posibles modelos de predicción de los extractables de Ni y Co para estabilizarlos, así como- disminuir el exceso de fuel oil en la MR en el nivel deseado (por criterios de optimización técnico-económica) para la lixiviación y la destilación del licor producto debido a las pérdidas de  $NH_3$  y Ni que causan los iones del azufre. Tales investigaciones requieren de la preparación de una UDP para generalizar de forma rápida los cambios resultantes de las investigaciones, debido a que los hornos existentes en las plantas piloto de Moa y Nicaro no permiten realizar investigaciones cinéticas reproducibles industrialmente por la falta de semejanza (de proporcionalidad geométrica, cinética, de transferencia de calor y energía por unidad de masa de mena).

En un futuro no muy lejano, el mayor reto investigativo en reducción consistirá en elevar los extractables de Ni y Co a niveles superiores que los actuales con menos costos por diferentes alternativas /5/. Esta línea, también conlleva a una

mayor metalización del Fe y a mayores contenidos de Fe (II) en la MR, lo cual será posible manejar, cuando se domine la nueva metodología de optimización del régimen de aireación, ya sea en los turboaireadores convencionales, en reactores tubulares /1/, o combinándolos con los turbos para alcanzar los resultados esperados. Por la experiencia acumulada en Cuba y el mundo sobre este reto, se puede comenzar la investigación a escala de planta piloto en un circuito de reducción–lixiviación y lavado. Esta decisión puede ser estratégica para el país, en el sentido de incluir en las pruebas, el procesamiento de menas crudas de yacimientos ya agotados o con bajos contenidos de Ni, los que pueden tratarse con aditivos nacionales como la pirita, lo que podría alargar la vida útil de las plantas cubanas.

## Conclusiones

1. Se fundamentó la importancia actual que tienen las investigaciones en UDP, para integrar las soluciones operacionales de las pérdidas de Co y Ni por pasivación con las de coprecipitación segregante. La magnitud potencial de la reserva de producción de Ni y Co, para las pérdidas por pasivación dependerá de: la velocidad de aireación, la  $CS_2O_3^{2-}$ , y del contenido de Fe0 en la mena reducida, y puede estimarse en alrededor de un 4 % de Fe total en la MR.
2. Se demostró que sólo es posible el incremento productivo en Co y Ni de las plantas cubanas con el menor costo, si se resuelven integralmente los temas analizados sobre inversión, ingeniería, investigación y su escalado en el circuito reducción- lixiviación-absorción de  $NH_3$  y  $CO_2$ –precipitación de cobalto.
3. Se fundamentaron los riesgos que pueden darse en la transferencia de la tecnología de los turboaireadores de Toncantins a Punta Gorda y la necesidad de realizar pruebas de adaptación de la nueva inversión para las condiciones operacionales de la planta cubana.
4. Se recomendó aprovechar la oportunidad que ofrece el nuevo método de optimización del

régimen de aireación para elevar los extractables de Ni y Co a niveles más competitivos como base de las estrategias de mediano y largo plazo, que incluye la reducción con pirita y la incorporación de menas limoníticas pobres en Ni.

## Bibliografía

1. CASTELLANOS, S. J.; ALVAREZ G. A.: "Hydrometallurgical Procedure for Nickel and Cobalt recovery". Patente No. 59804/98.
2. CHANG, A. R., RODRÍGUEZ, J. I.; DOBROJOTOV, G. N.: "Influencia del régimen de aireación sobre las extracciones de cobalto en la primera etapa de la lixiviación carbonato-amoniaca de los minerales reducidos de Ni", en *Minería y Geología*, vol.1, No.1, 1989, pp.51-62.
3. CHANG, A. R.: "Perfeccionamiento de la lixiviación carbonato-amoniaca", en *Memorias del VII Congreso Nacional de Ciencia y Tecnología Metalúrgicas*. CENIM. Vol.1, Madrid. España, 3-5 Octubre, 1990, pp.357-365.
4. CHANG, A. R. & BOBKOVSKI, A. G.: "Estudio Experimental de la hidrólisis de los iones de hierro durante la lixiviación carbonato-amoniaca de los minerales oxidados de Níquel previamente reducidos", en *Minería y Geología*, vol. 2, No. 2, 1993, pp.75-79.
5. CHANG, A. R.: "Una visión sobre las reservas estratégicas de Eficiencia Metalúrgica en la Tecnología carbonato – amoniaca", en *Minería y Geología*, vol. XVI, No.1, 1999, pp.76- 82.
6. FIFFE, L. J. & GRANDA, O.: " Mecanismo de disolución del níquel metálico en soluciones que contienen diferentes relaciones  $NH_3 / CO_2$  ", en *Rev. Cubana de Química*, vol. 1, No.1, 1985, pp. 31- 36.
7. KASHERININOV, G. O.: "Behavior of iron in ammoniacal solutions during leaching of cobalt from its ores", in *Zhurnal Prikladnoi Jimia*, vol. 33, No. 6, June 1960, pp. 1233 – 1239 (en ruso).
8. LEE, J. W, OSSEO-ASARE, K. & PICKERING, H. W.: "Anodic Dissolution of Iron in Ammoniacal Ammonium Carbonate Solution," in *Journal of the Electrochemical Society*, vol.132, 1985, pp. 550-555.
9. NICOL, M. J.; NIKOLOSKI, A.N. & FITTOCK, J.E.: "A fundamental study of the leaching reactions involved in the Caron Process", in *Proceeding International Laterite Nickel Symposium*. Charlotte, North Carolina, USA. March 14-18, 2004, pp. 369-384.

- 
10. NIKOLOSKI, A. N.; NICOL, M. J. AND FITTOCK, J. E.: "The passivation of iron during the leaching of pre-reduced laterites in ammoniacal solutions", in (Paper presented at 203th Meeting of the Electrochemical Society). Paris, France, April 27- May 2, 2003, pp.1-15.
  11. OSSEO – ASARE. J. W.; LEE, H. S.; KIM, AND H. W. PICKERIG.: "Cobalt extraction in ammoniacal solution: Electrochemical effect of metallic iron", in Metallurgical Transaction B, vol. 14 B, December1983, pp. 571-576.
  12. QUENEAU P.B.; WEIR D.R.: "Control of iron during hydrometallurgical processing of nickeliferous laterite ores", in Iron control in Hydrometallurgy, Dutrizac, J. E. & A. J. Mohemius, Eds., Ellis Horwood Ltd, Chichester. 1986, Ch.4, pp. 76-103.
  13. QUINTANA, S. R.; SAAVEDRA, C.; RODRÍGUEZ, G. R. et al.: "Reporte de la misión a Brazil-Venezuela por Che Guevara-CCN-UNi-MINBAS, 1999, 96 p.
  14. REID, J. D. & FITTOCK, J. E.: "Yabulu, 25 years on", in Proceeding International Laterite Nickel Symposium, 2004. Charlotte, North Carolina, USA, March 14-18, 2004, pp. 599-618.
  15. RODRÍGUEZ, J. I.; CHANG, A. R.; BELOGLAZOV, I. N.: "Estudio de la lixiviación carbonato-amoniaca de los minerales reducidos durante el tratamiento de las menas oxidadas de Ni", en Tsvetnie Metally, No. 2, 1994, pp.22-24 (en ruso).
  16. ROJAS, V. A.; TRUJILLO, M. A.: "Efecto del incremento de la concentración de azufre en los licores amoniacaes, sobre la extracción del níquel y el cobalto". Informe Técnico, Prueba Planta Piloto, CEINNIQ, Nicaro, 2004.
  17. ROJAS, V. A.: "Metodología perfeccionada para determinar el Extractable de Ni y Co en la lixiviación carbonato-amoniaca". [Universidad de Oriente], Santiago de Cuba. (Tesis de Master en Ingeniería Química), 2007, 108 p.