

Diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniserias en la lixiviación industrial del proceso “Caron” en la planta de Punta Gorda, Cuba

Diagnosis of the Technological Efficiency of the Miniseries' Work in the Industrial Leaching of the Caron Process at Punta Gorda Plant, Cuba

Dr. C. Antonio R. Chang-Cardona^I, achang@ismm.edu.cu; Ing. Pedro L. Terencio-Guevara^{II}, pmerencia@cil.minem.cu; Ing. Yosbel Guerra-González^I

^IInstituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Holguín, Cuba;

^{II}CEDINIQ, Holguín, Cuba

El presente trabajo experimental se realizó a escala de Unidad Demostrativa de Producción (UDP) en la Planta de Lixiviación de Punta Gorda con el objetivo de establecer un procedimiento seguro para el diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniserias, el cual permita detectar a tiempo: las obstrucciones en el sistema y la distribución desigual de pulpa con el propósito de operar los parámetros de aireación de forma óptima, y así gestionar la limpieza de las tuberías con prontitud para evitar los desbalances prolongados de los lixiviados de Ni y Co (LixNi-Co) en las Series de primera etapa de lixiviación (IraEL). Este proceder fue demostrado, y validado el orden de sus partes, el cual consta de tres pasos: primero, el estudio diario de las densidades de la pulpa en el sistema Tanques de Contacto (TC)-Series de IraEL para detectar los valores críticos de las densidades; segundo, realizar pruebas de comparación de LixNi-Co en las dos miniserias cuando dichos valores de densidades lo aconsejen y tercero, determinar la distribución del flujo de pulpa en cada miniserie por el tiempo de residencia para confirmar los resultados de los dos pasos anteriores y recalcular los flujos volumétricos de aire por miniserie y turbo-aireador. Se estableció que los valores críticos de densidades que permiten predecir una obstrucción excesiva para cada tubería de la miniserie son: $1\ 175\ \text{kg/m}^3$ en relación con la ρ_{prom} en TC de $(1\ 160-1\ 165)\ \text{kg/m}^3$, como lo es $1\ 185\ \text{kg/m}^3$, respecto a ρ_{prom} cercanas o menores que $1\ 170\ \text{kg/m}^3$.

Palabras clave: proceso “caron”, lixiviación carbonato-amoniaca, diagnóstico de miniserias.

The present experimental work was carried out to scale of Demonstrative Unit of Production (UDP) in the Leaching Plant of the Punta Gorda in Cuba with the objective of establishing a sure procedure for the diagnosis of the technological efficiency of the miniseries work, which allows to detect on time: the obstructions in the system and the unequal distribution of pulp with the purpose of operating the aeration parameters of the optimum form, and so to negotiate the cleaning of the pipes with readiness to avoid the extended unbalances of the Ni and Co leached (LixNi-Co) in the Series of the first leaching stage (IraEL). This to proceed was demonstrated, and validated the order of their parts, which consists of three steps: First, the daily study of the pulp densities in the system: Contacts Tanks (TC)-Series of IraEL to detect the critical values of the densities; Second to achieve tests of LixNi-Co in the two miniserias when this values of densities advise it; Third - to determine the distribution of the pulp flow in each miniserias from the residence time to confirm the results of the two previous steps and to calculate again the volumetric flows of air for each miniserias and turbo-aereator. It was established that the critical values of densities that permit to predict an excessive obstruction for each pipe of the miniserias are: $1\ 175\ \text{kg/m}^3$ in relation with the ρ_{prom} in TC of $(1160-1165)\ \text{kg/m}^3$, as it is the $1\ 185\ \text{kg/m}^3$, in regard to ρ_{prom} near or smaller than $1170\ \text{kg/m}^3$.

Keywords: process "caron", ammonia-carbonate leaching, miniseries diagnosis.

Introducción

La lixiviación industrial del proceso CARON que se desarrolla actualmente en la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” (ECG) en el poblado de Punta Gorda -como se conoce en el mundo-, municipio de Moa, provincia de Holguín, Cuba, tiene la particularidad de desarrollarse en tres series de turbo-aireadores (TA) en la primera etapa de lixiviación (IraEL), compuestas por dos miniserias de cuatro TA como se representa en la figura 1. Su mayor riesgo productivo lo constituye el desbalance de los lixiviados de Ni (LixNi) y Co (LixCo) entre miniserias, causado por obstrucciones excesivas de costras de mineral reducido (MR) en alguna de las dos tuberías de alimentación a las miniserias, cuya resistencia hidráulica provoca la desigualdad de flujos volumétricos de pulpa (Q_{pulpa}), así como por problemas en la distribución de Q_{pulpa} a las series de IraEL desde el distribuidor D-100 por tupición de alguna línea de alimentación y otros problemas operacionales en la planta, todo lo cual requiere de un conocimiento inmediato para poder corregir los flujos de aire en los TA de las miniserias en el menor tiempo posible, y así evitar un desbalance prolongado de los LixNi y LixCo que afectaría sus producciones.

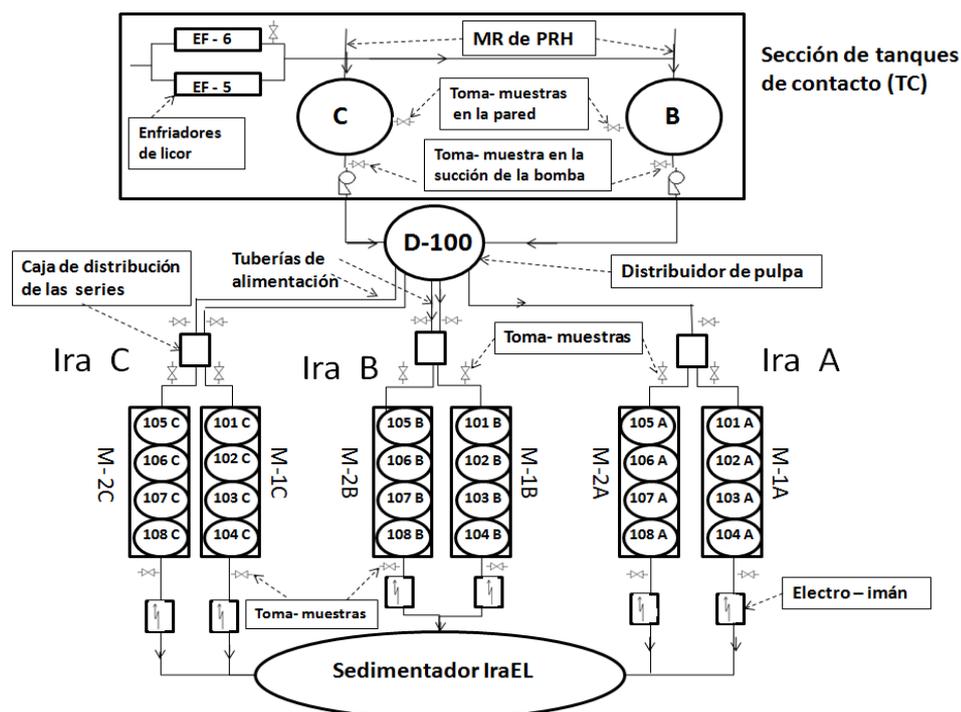


Fig. 1 Caracterización de la Unidad Demostrativa de Producción (UDP)

El concepto de obstrucción excesiva se introduce para diferenciarla del encostramiento natural que sufren las tuberías al depositarse las sales dobles de magnesio que provienen del licor y se pegan a sus paredes metálicas que con el tiempo pueden reducir el diámetro de la tubería. La obstrucción excesiva incluye la deposición sobre la capa de sales de magnesio de las arcillas y partículas muy gruesas- tipo piedras- que no se pegan a la pared (arenamiento), pero que son difíciles de arrastrar por el flujo y, por tanto, constituyen una resistencia adicional al paso del flujo de pulpa.

Para alcanzar resultados muy cercanos de los mencionados Lixiviados se requiere realizar un diagnóstico eficaz del trabajo de las miniserias para operar con certeza el flujo de aire en éstas, el cual consta de los pasos y propósitos siguientes:

Determinar diariamente las densidades de la pulpa alimentada al sistema- desde TC hasta la entrada a cada miniserie- para detectar a tiempo, posibles obstrucciones y tendencia a la distribución desigual de pulpa en las miniserias y series de la IraEL.

Comparar los lixiviados de Ni y Co (LixNi-Co) de ambas miniserias cuando los valores de densidades de la pulpa alimentada lo aconsejen para conocer la magnitud de sus diferencias.

Determinar el tiempo de residencia real (TR) en la serie que los LixNi-Co indiquen su necesidad, basado en el uso del carbonato de sodio como trazador para cuantificar la proporción de Q_{pulpa} distribuida por miniserie, y por consiguiente, calcular los flujos de aire adecuados para alcanzar los LixNi-Co esperados, comprobándolos por el paso b.

El objetivo principal del presente trabajo es demostrar experimentalmente un procedimiento seguro que consta de los tres pasos mencionados, para el diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniserias de IraEL, el cual permita detectar a tiempo las obstrucciones en el sistema y la distribución desigual de pulpa con el propósito de operar los parámetros de aireación de forma óptima antes de su limpieza, y la finalidad económica de elevar la producción de Ni y Co, mediante el incremento de los LixNi-Co en la Serie de IraEL.

Fundamentos teóricos

Las densidades de la pulpa se determinan por la metodología clásica de la probeta de 1000 mL, al restarle el peso de la probeta llena de pulpa a la vacía, cuyo resultado es la masa de pulpa contenida en dicho volumen, calculando su densidad por la ecuación:

$$\rho_{pulpa} = \frac{m_{pulpa}}{V_{probeta}} ; \frac{g}{l} \text{ ó } \frac{kg}{m^3} \quad (1)$$

Los lixiviados de Ni y Co se calculan por la metodología establecida en la ECG, respecto al mineral alimentado (MA) a la planta de hornos de reducción (PHR), expresada por la fórmula general:

$$Lix (Me) = \left[1 - \left(\frac{Fe_{MA}}{Fe_{MLix}} \cdot \frac{Me_{MLix}}{Me_{MA}} \right) \right] \cdot 100, (\%) \quad (2)$$

Por analogía se calculó los incrementos de dichos lixiviados en cada miniserie, respecto al mineral reducido que forma parte de la pulpa alimentada a la serie y sus miniseries de TA:

$$\Delta Lix (Me) = \left[1 - \left(\frac{Fe_{MEntra}}{Fe_{MSale}} \cdot \frac{Me_{MSale}}{Me_{MEntra}} \right) \right] \cdot 100, (\%) \quad (3)$$

donde

(*Me*) representa al Ni o al Co

Lix (Me) y $\Delta Lix (Me)$ son los lixiviados de Ni y Co o sus incrementos en las miniseries de IraEL

Fe_{MA} y *Fe_{MEntra}* contenidos de Fe en el MA a la PHR y en el MR que forma parte de la pulpa alimentada a la serie y sus miniseries de TA, (%)

Fe_{MLix} y *Fe_{MSale}* contenidos de Fe en el mineral lixiviado - a la salida del último TA- de la Serie y de cada miniserie o Etapa de la Planta de Lixiviación,

(%) *Me_{MA}* y *Me_{MEntra}* contenidos de Ni y Co en el MA a la PHR y en el MR que forma parte de la pulpa alimentada a la serie y sus miniseries de TA, (%);

Me_{MLix} y *Me_{MSale}* contenidos de Ni y Co en el mineral lixiviado de la Serie y de cada miniserie o Etapa de la Planta de Lixiviación, (%).

Los fundamentos teóricos para determinar los tiempos de residencia medio (*TR_m*) en sistemas ideales son bien conocidos en la literatura clásica de la ingeniería química /3/ y se calcula por la expresión:

$$TR_m = \frac{\sum_{i=0}^n t_i (C_i - C_0)}{\sum_{i=0}^n (C_i - C_0)} \quad (4)$$

Si en las pruebas experimentales se emplea el carbonato de sodio como sustancia trazadora, entonces, en la ecuación (4):

C_0 - concentración de Na en licor en la muestra cero, tomada antes de suministrar el carbonato de sodio a la caja de distribución, considerado el tiempo inicial (t_0).

C_i - concentraciones de Na en las muestras, tomadas a cada tiempo (t_i).

El tiempo de residencia teórico (TR_T) de la mayoría de las partículas del MR en cada miniserie es el cociente del volumen útil ($V_{\text{útil}}$, m^3) de los TA en ésta entre el flujo volumétrico (Q_{pulpa} , m^3/h) que se alimenta a la misma:

$$TR_T = \frac{V_{\text{útil}}}{Q_{\text{pulpa}}}, h \quad (5)$$

El $V_{\text{útil}}$ de los TA y miniseries disminuyen con el tiempo de operación por la acumulación progresiva de partículas sólidas que contiene el MR (arenamiento), lo que provoca una variación simultánea de los tiempos de residencia y los flujos Q_{pulpa} . Esto se demuestra al obtener experimentalmente los valores de TR_m por la expresión (4) para cada miniserie y sustituirlos por los TR_T en la ecuación (5). Al despejar de ésta última Q_{pulpa} para cada miniserie, la suma de las mismas, se aleja notablemente del valor del flujo volumétrico de pulpa real (calculado sobre la base de mediciones) que se alimenta a la Serie. Por tal razón, se introduce el concepto de tiempo de residencia real (TR) de la pulpa en cada miniserie, calculado por una ecuación homóloga a la (5), pero por el método de aproximaciones sucesivas, mediante el cual se fija cada vez un $V_{\text{útil}}$ y se tantean los TR de cada miniserie hasta que se alcance la suma del Q_{pulpa} de la serie. Esta fundamentación aparece explicada detalladamente en el artículo /2/.

Métodos utilizados y condiciones experimentales

Las pruebas industriales se realizaron en la UDP que se muestra en la figura 1, con la particularidad de que evaluación de los LixNi-Co en la IraEL se realizó en la Serie B de la Planta de Lixiviación de la Empresa ECG, la cual consta de dos miniseries (M-1B y M-2B) con 4 TA cada una. Esta serie se recibió en la segunda semana del mes de marzo de 2014 acabada de reparar y limpiar, por lo que según se demostró en el mencionado artículo sobre el TR, su $V_{\text{útil}}=224 m^3$ (de la miniserie) y el de cada TA es de $56 m^3$.

Determinación de las densidades de la pulpa en la UDP

Con este propósito se tomaron las muestras en pomos plásticos graduados hasta 1 L en los puntos siguientes (ver figura 1):

En los tanques agitados de las Series B y C de los TC: pared y tubería de succión de la bomba, la primera contiene la mayoría de partículas finas del MR por el pequeño diámetro del tubo toma-muestra, mientras la segunda, incluye las partículas más gruesas. Las cuatro densidades resultantes se promedian para asignarla a la sección de TC y servirá de referencia operativa a las que se obtendrán en las miniserias de IraEL.

En las miniserias de la IraEL- Serie B: tuberías de entrada a la M-1B y M-2B, situadas a la salida de la caja de distribución de pulpa. Los valores de estas densidades son las principales para operar el aire en la Planta por la distribución de pulpa en estas.

En las tuberías que alimentan a las cajas distribuidoras de pulpa de las series A, B y C de la IraEL con el propósito de comprobar la tendencia de distribución desigual que proviene del distribuidor D-100. En el presente trabajo solo se dará la densidad de la Serie B para abordar el fenómeno de obstrucción excesiva.

Para conocer la masa de sólido en la probeta de 1 L se necesita determinar la densidad del licor que se alimenta a TC para calcularla por la diferencia entre las masas de pulpa y de licor, por lo que se tomaron tres muestras de los licores que salen del enfriador de placa 106 en pomos plásticos de 1 L cada vez. La comparación de las masas de sólido en cada miniserie y serie permite establecer una tendencia en la distribución de MR y pulpa en el sistema.

El pesaje de las probetas vacías y llenas de pulpa o licor se realizó en una balanza analítica electrónica de marca RADWAG para un pesaje máximo de 10 kg con una precisión de $\pm 0,1$ g.

Las densidades se midieron durante varios días en diferentes meses (marzo, abril y mayo) para demostrar su evolución en el tiempo y determinar el riesgo de obstrucciones y distribución desigual de pulpa por sus valores.

Pruebas de comparación de incrementos de lixiviados en las miniserias

La comparación de los incrementos (Δ) de los lixiviados (LixNi y LixCo) en las miniserias M-1B y M-2B, calculados por la ecuación (3) se realizó por la metodología siguiente:

Se tomaron cuatro muestras al mismo tiempo en las tuberías de entrada de los TA 101 B y 105 B y salida (TA: 104 B y 108 B) de cada miniserie (ver figura 1) en 2 pomos plásticos (por cada toma-muestra) de 250 mL (cada uno) herméticamente tapados y de boca ancha para que cubra todo el área del

chorro de pulpa que sale del toma-muestra. Este procedimiento se realizó cada 2 h en los horarios (8 am, 10 am, 12 m y 2 pm).

Por consiguiente, se obtuvieron cuatro compósitos de sólidos de la forma siguiente: después de reposar la pulpa media hora se decantó el líquido, se filtró la pulpa restante y la torta se lavó con agua amoniacal en un filtro con vacío en las instalaciones del laboratorio de la empresa ECG. El sólido lavado se echó en un pomo plástico de 500 mL con cierta cantidad de agua, donde se acumula hasta que la última muestra se procese. Entonces, se filtró todo el compósito para cada toma-muestra.

Posteriormente se secó en dos platillos metálicos en una estufa a 120 °C durante 2h. Cuando se enfrió, se homogenizó y trituró en un mortero, después de lo cual se envió al laboratorio analítico del Centro de Investigaciones y Desarrollo de la Industria del Níquel (CEDINIQ) para la determinación del contenido total de Fe, Ni y Co en cada compósito de sólido por el método de espectrometría de absorción atómica (AAS).

Se realizaron tres pruebas a temperaturas de la pulpa en los TC entre (36-39) °C en algunas de las fechas comprendidas en los ensayos de densidades para comparar sus resultados normales de LixNi-Co con los que indican una obstrucción excesiva. En todas, se respetaron las condiciones de producción que la dirección técnica de la Planta determinó bajo sus criterios de distribución equitativa de pulpa por serie y miniserie y cálculo del aire para cada TA, cuyos valores de flujo volumétrico se colocaron en el set point (ver el 12 de mayo en la tabla 1b) del sistema de supervisión y control de procesos- CITECT- que está en la INTRANET de la empresa ECG. Sin embargo, el estado técnico del sistema de alimentación de aire hacia los TA, así como la tupición parcial de algunos bajantes de TA hizo diferente los resultados reales de los indicadores de aireación que se obtienen al final de cada prueba (ver tablas 1b y 1c). Los datos que reflejan las condiciones de realización de las pruebas se tomaron del CITEC y se muestran en las tablas 1a, 1b y 1c.

Tabla 1a
Contenido total de metales en MA (%) a PHR y Licor lixiviante

FECHA	Contenido de Me (%) en MA a PHR						NH ₃	Relación
	Ni	Co	Fe	MgO	SiO ₂	NoMin	g/L	NH ₃ /CO ₂
30-abr	1,16	0,104	39,20	3,08	11,34	1,30	80,8	1,74
06-may	1,20	0,107	40,35	3,14	9,90	1,55	78,6	1,72
12-may	1,16	0,107	39,50	3,28	10,61	1,32	77,8	1,71

Tabla 1b
Flujos de aire reales (m³/h) y sus desviaciones estándares promedio en cada TA

FECHA	MINISERIE-1 B				MINISERIE-2 B			
	101	102	103	104	105	106	107	108
30-abr	840±3,2	827±5,8	829±20,1	836±6,5	840±7,2	830±3,0	900±21,6	819±3,0
06-may	841±14,7	830±5,5	891±8,1	808±3,4	840±6,3	830±3,1	820±15,6	803±101,8
12-may	840±2,4	830±6,8	820±8,5	810±2,8	840±10,3	830±3,4	820±15,4	810±3,0

Tabla 1c
Indicadores de aireación por miniserie

FECHA	MINISERIE-1 B		MINISERIE-2 B	
	V _a	Q _a	V _a	Q _a
	m ³ /t	m ³ /(t.min)	m ³ /t	m ³ /(t.min)
30-abr	164	1,62	146	1,63
06-may	145	1,79	108	1,77
12-may	152	1,59	89	1,59

donde

NoMin es el Número de mineral, el cual se calcula por los contenidos en % de los metales y compuestos de la tabla 1a por la ecuación:

$$NoMin = \frac{Fe \cdot Ni}{SiO_2 \cdot MgO} \quad (6)$$

NH₃ y NH₃/CO₂ concentración de amoníaco y su relación con la del dióxido de carbono en el licor de IraEL.

V_a, (m³/t) volumen específico de aire

Q_a, [m³/(t.min)] velocidad específica del aire

La determinación del TR para calcular las proporciones de Q_{pulpa} en cada miniserie se realizó por la metodología de la sustancia trazadora Na₂CO₃, publicada por los autores de este trabajo /2/, y basado en el fundamento teórico dado antes. Para el procesamiento de los resultados se empleó el Microsoft Office Excel 2010.

Resultados y discusión

Los resultados de las densidades promedio de pulpa para los días seleccionados se muestran en la tabla 2.

Tabla 2
Resultados de las pruebas de densidades en la UDP

Fecha	Densidades promedio de pulpas (kg/m ³) en los toma-muestras:						Fracción de sólido		P _{liq} enfr.
	Succión en Bombas TC	Pared TC	De todos en TC (ρ_{prom})	Ira B	M-1B	M-2B	M- 1B	M- 2B	kg/m ³
26-marzo	-----	1 134	-----	1 160	1 139	1 151	0,48	0,52	1 039
22-abril	1 171	1 141	1 156	1 162	1 149	1 154	0,49	0,51	1 041
29-abril	1 173	1 129	1 151	1 196	1 144	1 159	0,47	0,53	1 040
30-abril	1 167	1 152	1 160	1 267	1 175	1 229	0,42	0,58	1 040
02-mayo	1 208	1177	1 193	1 242	1 197	1 192	0,51	0,49	1 042
06-mayo	1 203	1 148	1 175	1 260	1 208	1 157	0,59	0,41	1 042
08-mayo	1 198	1 160	1 179	1 343	1 234	1 171	0,59	0,41	1 025
12-mayo	1 182	1 159	1 170	1 298	1 185	1 172	0,52	0,48	1 043
13-mayo	1 173	1 154	1 164	1 208	1 175	1 163	0,52	0,48	1 042
21- mayo	1 180	1 161	1 170	1 205	1 233	1 173	0,59	0,41	1 040

La interpretación de la tabla 2 es la siguiente:

Las densidades de la succión (ρ_{suc}) de las bombas en la salida de los TC son las mayores de dicha sección, ya que las muestras contienen las partículas más gruesas del MR, a diferencia de los toma-muestra de la pared que contienen las más finas por el pequeño diámetro del tubo instalado y por la altura que se encuentra éste sobre el piso del tanque.

En condiciones normales, las densidades de las miniserias son menores que ρ_{suc} y cercanas o menores que la densidad promedio de todos los toma-muestras (ρ_{prom}) en TC que incluye la precisión del método ($\pm 3-4$ kg/m³), lo cual sucede en las dos miniserias del 26 al 29 de abril y en la miniserie 2 en casi todos las fechas con excepción del 30-abril. Cuando las densidades de las miniserias (ρ_{m-1B} y ρ_{m-2B}) son mayores que las ρ_{prom} más la precisión mencionada, entonces, significa que comienza un proceso de obstrucción excesiva en la tubería de alimentación, lo que se manifiesta en la miniserie 1 (M-1B) a partir del día 30-abril. La tubería de alimentación a la Serie IraB se manifiesta con densidades muy superiores que la de ρ_{suc} , lo cual es lógico

porque toda la pulpa pasa por la misma, aumentando la acumulación de arena y piedras; la que se hace notar en su toma-muestra a partir del 29 de abril.

Lo interesante del comportamiento de estas densidades es que comienza a aumentar gradualmente hasta el 8 de mayo ($1\ 343\ \text{kg/m}^3$), descendiendo poco a poco, respecto a la ρ_{suc} de su día correspondiente. Mientras tanto, las densidades en la miniserie M-1B van creciendo respecto a la ρ_{prom} de su día, siendo éstas mayores que las de la miniserie M-2B. Estos síntomas se pueden interpretar de la forma siguiente: en la tubería de alimentación de pulpa a la Serie IraB va aumentando el espesor de costra hasta que el flujo de pulpa va trasladando parte del arenamiento para la caja de distribución y pasa en mayor medida para la M-1B, hasta tal punto, que va reduciendo el diámetro de la tubería que alimenta la miniserie M-1B, cuya resistencia hace que la mayor parte de éste se desvíe para la M-2B. Esta interpretación se ajusta plenamente con los resultados obtenidos en las pruebas de diferencias de lixiviados de Ni y Co para el día 12-mayo (ver tabla 3), así como, en las de TR el día 13-mayo (ver tabla 4), las cuales se analizarán más adelante.

Para las operaciones en la Planta es importante definir los valores de densidad de pulpa que son críticos para predecir posibles obstrucciones con el propósito de pedir el servicio científico técnico al CEDINIQ para realizar la comparación de los lixiviados de Ni y Co en las miniseries y determinación de la proporción de flujos de pulpa en cada miniserie por las pruebas de TR, las cuales permitirán tomar las decisiones sobre el gasto de recursos materiales para limpiar las obstrucciones excesivas en el menor tiempo posible para evitar pérdidas prolongadas de producción de Ni y Co.

Para la tubería de entrada a la caja de distribución de la Serie Ira B, estos valores están por encima de $1\ 195\ \text{kg/m}^3$ y con mayor seguridad por encima de los $1200\ \text{kg/m}^3$, lo que indicaría el riesgo de comienzo del traslado de parte del arenamiento acumulado en la tubería principal hacia el interior de la caja de distribución de la serie. A medida que este valor aumente, se puede considerar que dicha tubería se comienza a obstruir y habrá que limpiarla. Para cada tubería de la miniserie los valores críticos de la densidad de la pulpa estarán en: $1\ 175\ \text{kg/m}^3$ en relación con la ρ_{prom} de $1\ 160$ - $1\ 165\ \text{kg/m}^3$, como lo es $1\ 185\ \text{kg/m}^3$, respecto a ρ_{prom} cercanas a $1\ 170\ \text{kg/m}^3$. No obstante, el fenómeno de obstrucción excesiva hay que analizarlo como un

proceso acumulativo que se manifiesta en un sistema de valores de densidades en: la tubería de alimentación a la serie - tuberías de alimentación a las miniserias en referencia con las densidades promedio de TC.

Por otra parte, la correlación de valores de densidades de las miniserias y sus fracciones de masa de sólido en la probeta de 1 L se corresponden con la posición de la tubería que alimenta la caja distribuidora (son 2), una más cercana a la miniserie M-2B que se ajusta a la situación operativa de los primeros días del 26 al 30 de abril, y la otra, más cercana a la M-1B, que caracteriza al resto de los días de la tabla 2, lo cual pudo ser engañoso para detectar la obstrucción excesiva, si no fuera por los valores críticos de las densidades, ya que se pudo pensar que las correlaciones de flujo de pulpa estaban correctas. Por consiguiente, el valor crítico de la densidad permite identificar cuando se trata de una obstrucción excesiva en lugar de una tendencia a la distribución de pulpa en las miniserias. La distribución real cuantificada de Q_{pulp} se determina por la prueba de TR.

Una confirmación de la efectividad del procedimiento operacional explicado lo constituyó la detección temprana de la obstrucción excesiva de la tubería de alimentación de pulpa a la caja de distribución de la Serie IraA por las densidades de la miniserie M-2A, las cuales entre los días del 9 al 11 de julio tomaron valores de (1 175 - 1 200) kg/m^3 , mientras que la M - 1A mantuvo valores algo más bajo (1 166 - 1 175) kg/m^3 . Posteriormente, estos descendieron hasta (1 160 - 1 167) kg/m^3 , indicando que se dejó de arrastrar “arena” y piedras hacia la caja debido al pobre flujo de pulpa que pasó por la disminución del diámetro de la tubería.

La particularidad de esta serie A es que existe una sola tubería de alimentación, la cual mantuvo valores muy elevados de densidades superiores a 1 200 kg/m^3 desde sus inicios de operación, por lo cual tiende a cerrarse más rápido que el resto de sus series homólogas. Por consiguiente, al observar este comportamiento, el día 11 se mandó a comprobar su taponamiento en el distribuidor D - 100, el cual manifestó la presencia de muchos sólidos en su compartimiento.

Los días posteriores confirmaron el cierre total de dicha tubería, lo que provocó el paro de la Serie IraA el día 16 de julio. Los resultados de las pruebas comparativas de LixNi-Co y sus incrementos durante los días de sospecha de obstrucción excesiva en la M-1B se muestran en la tabla 3.

Tabla 3
Resumen de los resultados de los lixiviados
de Ni y Co y sus incrementos

FECHA	M-1B		M-2B		Diferenc. Δ Lix, %	
	Δ Lix, %		Δ Lix, %		(M1-M2)B	
	Ni	Co	Ni	Co	Ni	Co
30-abr	67,2	43,5	58,5	33,1	8,7	10,4
06-may	62,8	32,0	53,3	28,5	9,6	3,5
12-may	68,5	44,7	57,5	45,9	11,0	-1,2
Promedio	66,2	40,1	56,4	35,8	9,8	4,2
FECHA	M-1B		M-2B		Difer. Lix-S, %	
	Lix-S, %		Lix-S, %		(M1-M2)B	
	Ni	Co	Ni	Co	Ni	Co
30-abr	70,6	27,4	67,7	25,5	2,9	1,9
06-may	74,4	22,6	66,9	16,2	7,7	6,0
12-may	75,8	31,8	67,5	32,5	8,3	-0,8
Promedio	73,6	27,3	67,4	24,7	6,2	2,5

La tabla 3 muestra con claridad que la miniserie M-1B se favorece apreciablemente en los Lixiviados de Ni en sus dos indicadores (Δ Lix y Lix-S), mientras que el LixCo solamente es mayor en la M - 2B el día 12 de mayo (después del día crítico de la obstrucción excesiva- el 8-mayo), lo cual indica que el volumen de aire específico dado en esta miniserie es mucho menor que en la M - 1B (ver tabla 1c), por lo que pasó un flujo de pulpa mucho mayor para la M - 2B y al suministrarle el mismo flujo de aire a cada miniserie, se produjo un déficit de aire sustancial en la M-2B que provocó una caída brusca del LixNi y un mayor LixCo por concepto de disminución de las pérdidas por coprecipitación del Co^{3+} con los óxidos e hidróxidos de hierro (OHH), al descender apreciablemente la velocidad de oxidación de los iones de Fe^{2+} en el licor lixiviante que permite precipitar cristales de OOH mejor formados, los cuales poseen menor capacidad de adsorción /1/.

Es necesario destacar que a medida que pasan los días, la obstrucción en la miniserie M-1B va aumentando, lo que se refleja en el incremento gradual de los lixiviados de Ni y sus correspondientes incrementos. Estos resultados son compatibles con la interpretación dada sobre el comportamiento de los valores de densidades de la tabla 2 y la distribución del flujo de pulpa en las miniseries por la evolución del proceso de obstrucción excesiva.

Para cuantificar la proporción de flujos de pulpa que permita rectificar los indicadores de aire en las miniseries se realizó la prueba de TR el día 13 de

mayo y se corroboró posteriormente el 9 de junio, antes que se procediera a la limpieza de la tubería. Estos resultados se toman del citado artículo de los autores de este trabajo y se muestran en la tabla 4. Como se puede observar en dicha tabla, la miniserie M-2B trabajó con el (64 y 69) % del Q_{pulp} que se suministró a la Serie B, lo que indicó una obstrucción severa en la tubería que alimenta a la M-1B, lo cual se comprobó los días posteriores al 9 de junio, cuando la grúa bajó las dos tuberías que alimentan a las miniseries. Con esto, también, se validó los resultados de los LixNi-Co del 12 de mayo, como se muestra anteriormente en la tabla 3. Evidentemente, es apreciable el impacto económico que tiene la detección temprana de las obstrucciones por la posibilidad de recalcular el aire para evitar los desbalances prolongados de LixNi-Co en la serie antes de la limpieza y gestionarla con prontitud.

Tabla 4
Resultados de las pruebas de tiempo de residencia [2]

		Fecha de la prueba		13 de mayo		9 de junio	
PARÁMETRO	Unidad / pertenencia	M-1B	M-2B	M-1B	M-2B		
TR_m ,	(min)	101,0	59,0	109,0	66,0		
TR	(min)	125,5	56,9	102,8	58,2		
Q_{pulp} por: en (m^3/h)	TR_m	132,2	227,4	121,8	201,2		
	Total TR_m	359,6		323,0			
	TR	106,0	233,8	129,2	228,2		
	Total TR	339,8		357,4			
Proporción de Q_{pulp} por TR	Fracciones de 1	0,31	0,69	0,36	0,64		
$V_{\text{útil}}$, de: en (m^3)	Serie	221,8		221,3			
	TA	55,5		55,3			

Es necesario esclarecer que se debe mantener el orden de los dos últimos pasos para evitar gastos innecesarios de sustancia trazadora en caso que los resultados de la comparación de los LixNi-Co no sean alarmantes.

Conclusiones

Se demostró experimentalmente a escala de UDP la efectividad del procedimiento estudiado para el diagnóstico de la eficiencia tecnológica del trabajo de las miniseries de IraEL, el cual permitió detectar a tiempo: las obstrucciones en el sistema y la distribución

desigual de pulpa con el propósito de operar los parámetros de aireación de forma óptima antes de su limpieza y gestionarla con prontitud. para evitar los desbalances prolongados de LixNi-Co en la serie.

Se validó el orden de las partes del mencionado diagnóstico, el cual consta de tres pasos: 1^{ro}- el estudio diario de las densidades de la pulpa en el sistema TC-Series de IraEL para detectar los valores críticos de las densidades; 2^{do}- realizar pruebas de comparación de LixNi-Co en las dos miniserias cuando dichos valores de densidades lo aconsejen; 3^{er}- determinar la distribución del flujo de pulpa en cada miniserie por el tiempo de residencia para confirmar los resultados de los dos pasos anteriores y recalcular los flujos volumétricos de aire por miniserie y TA.

Se demostró que el fenómeno de obstrucción excesiva hay que analizarlo como un proceso acumulativo que se manifiesta en un sistema de valores de densidades en: la tubería de alimentación a la Serie - tuberías de alimentación a las miniserias en relación con las densidades promedio de la sección de TC

Se estableció que los valores críticos de densidades que permiten predecir una obstrucción excesiva para cada tubería de la miniserie son: 1 175 kg/m³ en relación con la ρ_{prom} en TC de (1 160-1 165) kg/m³, como lo es 1 185 kg/m³, respecto a ρ_{prom} cercanas o menores que 1 170 kg/m³.

Nomenclatura

Q_a , m³/(t·min) flujo volumétrico de aire por cada tonelada métrica de mineral reducido (MR) o velocidad específica de aire

V_a , m³/t volumen específico de aire, en metros cúbicos de aire por cada tonelada métrica de mineral reducido

$V_{\text{útil}}$ volumen útil de la miniserie o del turbo-aireador (TA), en (m³)

TR tiempo de residencia real de la pulpa en las miniserias de Ira Etapa de Lixiviación (IraEL), respecto al flujo volumétrico de pulpa calculado ese día, en (min) u (h)

Lix-S lixiviados de Ni y Co a la salida de cada miniserie

Δ Lix incrementos de los lixiviados de Ni y Co en cada miniserie

OHH óxidos e hidróxidos de hierro

Bibliografía

1. CHANG C, A.; BOBKOVSKI, A. G.; RODRIGUEZ D, J .I.; BELOGLAZOV I. N. “Estudio de las particularidades estructurales y composición de fase de los productos de la hidrólisis de los iones de hierro a partir de licores carbonato-amoniacaes”. *Revista Zvetnie Metalli*. 1995, núm. 9, pp.30-34.
2. CHANG CARDONA, Antonio; MERENCIO GUEVARA, Pedro; GUERRA GONZÁLEZ, Yosbel y ROJAS VARGAS, Armando. “Consideraciones sobre la determinación del tiempo de residencia de la pulpa en la lixiviación industrial del Proceso “Caron” en la Planta de Punta Gorda. Cuba”. *Revista Tecnología Química*. Vol XXXV, 2015, núm. 1, pp 5-20.
3. WALAS, Stanley M. “Chemical Reactors: Residence time distribution (RTD) and reactor efficiency”. En: PERRY, Robert H.; GREEN, Don W.; MALONEY, James O (ed). *Perry's Chemical Engineers' Handbook*. 7th Edition. New York: McGraw Hill, 1997. Section 23. pp. 14-21.